



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY
A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ**

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV RADIOELEKTRONIKY

DEPARTMENT OF RADIO ELECTRONICS

**NÁVRH A KONSTRUKCE DVOJITÉHO
LABORATORNÍHO NAPÁJECÍHO ZDROJE**

DESIGN AND CONSTRUCTION OF DOUBLE LABORATORY POWER SUPPLY

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Miroslav Klein

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

prof. Ing. Lubomír Brančík, CSc.

BRNO 2018

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor **Elektronika a sdělovací technika**

Ústav radioelektroniky

Student: Miroslav Klein

ID: 186110

Ročník: 3

Akademický rok: 2017/18

NÁZEV TÉMATU:

Návrh a konstrukce dvojitého laboratorního napájecího zdroje

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Navrhnete zapojení dvojitého laboratorního napájecího zdroje s regulovatelnými výstupy $2 \times 0-25 \text{ V} / 0-3 \text{ A}$, jehož funkce i indikace nastavených parametrů budou řízeny mikrokontrolérem. Zdroje opatřete možností kombinace výstupních svorek (sériově, paralelně, funkce $A = B$), s patřičnými ochranami proti přetížení a zkratu. Správnou funkci dílčích zapojení ověřte simulacemi ve vhodném obvodovém simulátoru.

Na základě předchozích návrhových prací provedte konstrukci napájecího zdroje předepsaných parametrů, včetně návrhu desek plošných spojů v Eagle. Zdroj oživte a provedte laboratorní měření jeho základních parametrů, výsledky porovnejte s počítačovými simulacemi. Případné rozdíly detailně zdůvodněte.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] KREJČÍŘÍK, A. Lineární napájecí zdroje. Praha: BEN - technická literatura, 2002.

[2] FIELDING, J. Power Supply Handbook. Radio Society of Great Britain, 2006.

Termín zadání: 5. 2. 2018

Termín odevzdání: 24. 5. 2018

Vedoucí práce: prof. Ing. Lubomír Brančík, CSc.

prof. Ing. Tomáš Kratochvíl, Ph.D.
předseda oborové rady



UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

ABSTRAKT

Tato bakalářská práce se zabývá návrhem a konstrukcí dvojitého regulovatelného laboratorního zdroje stejnosměrného napětí s nastavitelnou proudovou limitací. Zdroj umožňuje práci ve dvou režimech. V prvním režimu lze regulovat napětí od 0V do 50V a proud omezit v rozsahu 0A až 3A, ve druhém režimu je rozsah napětí od 0V do 20V, a proudový rozsah od 0A do 6A. Obě poloviny zdroje jsou galvanicky oddělené a mohou pracovat nezávisle na sobě, nebo lze výstupy libovolně kombinovat bez nutnosti externího propojování. Celý zdroj je digitálně řízený pomocí mikrokontroléru.

KLÍČOVÁ SLOVA

Napájecí zdroj, laboratorní zdroj, lineární zdroj, regulace napětí, proudové omezení, operační zesilovač, A/D převodník, D/A převodník, I2C, Arduino

ABSTRACT

This bachelor thesis deals with design and construction of double laboratory DC power supply with adjustable output voltage and current limitation. Power supply can work in two states. First state allows regulation of output voltage from 0V to 50V and current limitation from 0A to 3A. In second state the range of output voltage is from 0V to 20V and output current can be set from 0A to 6A. Both supplies are galvanically separated and can work independently, or can be combined without need of external connection. Whole power supply is digitally controlled by microcontroller.

KEYWORDS

Power supply, laboratory supply, linear supply, voltage regulation, current limitation, operational amplifier, A/D converter, D/A converter, I2C, Arduino.

KLEIN, M. *Návrh a konstrukce dvojitého laboratorního napájecího zdroje*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2018. 40 s. Vedoucí bakalářské práce prof. Ing. Lubomír Brančík, CSc..

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svoji bakalářskou práci na téma *Návrh a konstrukce dvojitého laboratorního napájecího zdroje* jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího semestrální práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/nebo majetkových a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne

.....

(podpis autora)

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji vedoucímu semestrální práce prof. Ing. Lubomíru Brančíkovi, CSc. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc, trpělivost a cenné rady při zpracování mé semestrální práce.

V Brně dne

.....

(podpis autora)

OBSAH

Seznam obrázků	vii
Seznam tabulek	ix
Úvod	1
1 Teorie napájecích zdrojů.....	2
1.1 Lineární zdroje	3
1.2 Spínané zdroje.....	11
1.3 Digitální řízení	15
2 Návrh a konstrukce Zdroje	18
2.1 Deska zdroje	18
2.2 Základová deska	26
2.3 Digitální řízení a ovládání.....	31
3 Měření	34
3.1 Vnitřní odpor.....	34
3.2 Zatěžovací charakteristika	34
3.3 Výstupní zvlnění	37
Závěr	38
Literatura	39

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1.1	Blokové schéma lineárního zdroje.....	3
Obrázek 1.2	Schéma jednocestného usměrňovače.....	4
Obrázek 1.3	Schéma dvojcestného usměrňovače.....	5
Obrázek 1.4	Schéma můstkového usměrňovače	6
Obrázek 1.5	Schéma zdvojovače napětí.....	7
Obrázek 1.6	Scéma dvojstupňového kaskádního násobiče	7
Obrázek 1.7	Zvlnění napětí při dvojcestném usměrnění	8
Obrázek 1.8	Stabilizátor napětí se Zenerovou diodou	9
Obrázek 1.9	Zdroj napětí s operačním zesilovačem.....	10
Obrázek 1.10	Zapojení stabilizátoru 7805	10
Obrázek 1.11	Snižující měnič	11
Obrázek 1.12	Zvyšující měnič.....	12
Obrázek 1.13	Invertující měnič	12
Obrázek 1.14	Blokující měnič.....	13
Obrázek 1.15	Propustný měnič	13
Obrázek 1.16	Blokové schéma mikrokontroléru ATmega2560 [1]	16
Obrázek 2.1	Schéma napájení operačních zesilovačů.....	19
Obrázek 2.2	Napěťová regulace	20
Obrázek 2.3	Schéma proudového omezení	22
Obrázek 2.4	Schéma řídicí části	24
Obrázek 2.5	Schéma digitálního měření	25
Obrázek 2.6	Schéma napájecí části motherboardu.....	26
Obrázek 2.7	Schéma napájení zdrojů.....	27
Obrázek 2.8	Schéma kombinování výstupů zdrojů.....	28
Obrázek 2.9	Ovládání relé a ventilátorů.....	29
Obrázek 2.10	Schéma zpracování výstupních signálů ze zdrojů	30
Obrázek 2.11	Schéma zapojení LCD displaye	32
Obrázek 2.12	Schéma zapojení enkodéru	33
3.1	Počítačová simulace zatěžovací charakteristiky zdroje při změnách proudové limitace	35

3.2	Počítačová simulace zatěžovacích charakteristik zdroje při změnách nastavení napětí.....	35
3.3	Měření zatěžovací charakteristiky zdroje při změnách proudové limitace	36
3.4	Počítačová simulace zatěžovacích charakteristik zdroje při změnách nastavení napětí.....	36
3.5	Počítačová simulace výstupního zvlnění	37
3.6	Měření vsýtupního zvlnění	37

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1	Srovnání lineárních a spínaných zdrojů.....	14
Tabulka 2	Popis vývodů LCD displaye	31
Tabulka 3	Přehled funkcí tlačítek	33

ÚVOD

Tato práce se zabývá návrhem a konstrukcí dvojitého laboratorního zdroje. Jedná se tedy o zapojení dvou samostatných zdrojů, které jsou galvanicky oddělené, a jejich výstupy tak lze libovolně spojovat. Samozřejmostí je plynulé nastavení výstupního napětí a nastavitelná proudová limitace. Rozsah výstupního napětí, na které je zdroj navržen, je oproti zadání zvýšen na 50V z důvodu větší univerzálnosti zdroje.

Práce je rozdělena několika částí. První část je teoretická, a je věnována problematice napájecích zdrojů. Nejdříve jsou rozebrány jednotlivé části zdrojů lineární koncepce, a možnost jejich realizace. Dále následuje stručný přehled topologií zdrojů spínaných. Nakonec jsou srovnány důležité parametry zdrojů obou koncepcí. Prostor je věnován také možnostem digitálního řízení.

Druhá část práce je věnována řešení konstrukce celého zdroje. Zdroj je rozdělen na několik dílčích částí umístěných na samostatných deskách plošných spojů, jejichž zapojení je podrobně rozebráno.

Třetí část je věnována měření parametrů zkonstruovaného zdroje a srovnání s výsledky počítačové simulace.

1 TEORIE NAPÁJECÍCH ZDROJŮ

Napájecí zdroje jsou elektrické zařízení, jehož funkcí je dodávat napětí či proud o definované velikosti a průběhu do zátěže. Napájecí zdroje lze obecně rozdělit podle několika vlastností [6]:

a) Podle průběhu výstupního napětí a proudu:

- Stejnosměrné zdroje
- Střídavé zdroje

b) Podle možnosti regulace

- Regulovatelné
- Neregulovatelné

c) Podle zdroje energie

- Autonomní (bateriové, solární...)
- Využívající jiného zdroje (síťové)

d) Podle povahy vnitřních dějů

- Lineární
- Spínané

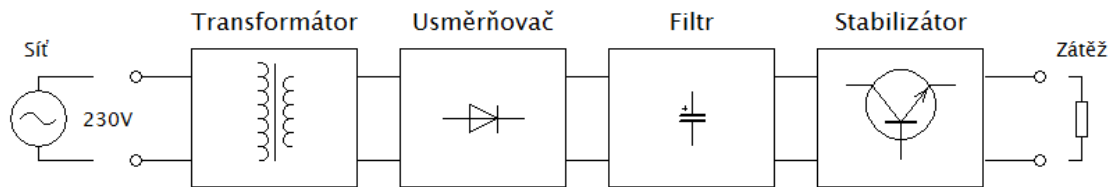
e) Podle určení

- Průmyslové (jednoúčelové)
- Laboratorní

Laboratorní zdroje jsou určeny k použití v laboratorním prostředí při vývoji a testování zařízení. Díky tomu jsou na ně kladeny větší nároky než na zdroje průmyslové. Mezi základní požadavky patří zejména stabilita výstupního napětí či proudu, aby změny neovlivňovaly napájené zařízení. Laboratorní zdroj by také měl být co nejuniverzálnější.

1.1 Lineární zdroje

Lineární stabilizovaný zdroj se skládá ze čtyř základních funkčních prvků (viz obr. 1.1). Jsou to: transformátor, usměrňovač, filtr a stabilizátor. Součástí stabilizátoru napětí může být i regulátor proudu [6].



Obrázek 1.1 Blokové schéma lineárního zdroje

1.1.1 Transformátor

Transformátor pracuje na principu elektromagnetické indukce, a slouží k přeměně elektrické energie o určitém napětí, na elektrickou energii o napětí jiném. Transformátor se skládá ze dvou nebo více elektrických obvodů a jednoho společného magnetického obvodu [3].

Magnetický obvod tvoří jádro z transformátorových plechů. Proud protékající primárním vinutím vytvoří v jádru magnetický tok ϕ . Tento magnetický tok budí napětí na sekundárním vinutí, resp. vinutích. Pokud uvažujeme ideální transformátor beze ztrát, platí vztah:

$$p = \frac{U_1}{U_2} = \frac{N_1}{N_2} = \frac{I_2}{I_1}, \quad (1.1)$$

kde p je převodní poměr transformátoru, U_1 [V] je napětí na primárním vinutí, U_2 [V] je napětí na sekundárním vinutí, N_1 je počet závitů primárního vedení, N_2 je počet závitů sekundárního vedení, I_1 [A] je proud primárním vinutím a I_2 [A] je proud sekundárním vinutím.

V lineárních zdrojích je úkolem transformátoru jednak změnit napětí sítě na potřebnou hodnotu (nejčastěji snížit), ale také napájené zařízení od sítě galvanicky oddělit.

Transformátory se vyrábí v mnoha provedeních, které se liší jak tvarem jádra, tak způsobem vinutí. Nejčastěji používanými typy jsou jádra z EI plechů, C jádra a toroidní transformátory. Transformátor z EI plechů je nejdostupnější varianta, hodí se ale pouze do určitých výkonů. Toroidní provedení se lépe uplatní při větších přenášených výkonech, jejich výroba je ale nákladnější. Vinutí mohou být vinuta ve vrstvách na sobě, nebo vedle sebe. Druhé provedení se volí zejména při práci s vysokým napětím.

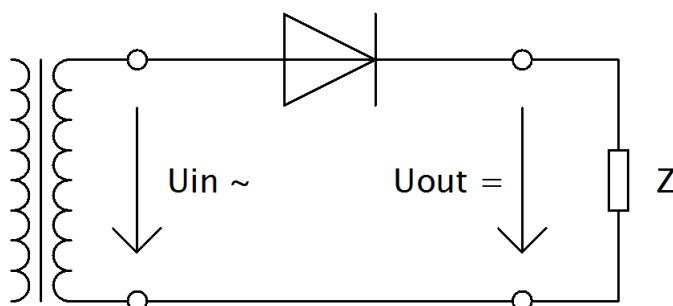
1.1.2 Usměrňovač

Úkolem usměrňovače je přeměnit střídavé napětí sekundárního vinutí transformátoru na stejnosměrné napětí. Základem zapojení jsou v dnešní době výhradně polovodičové součástky. Usměrňovače mohou být řízené nebo neřízené.

Ve slaboproudých zdrojích se ustálilo několik zapojení usměrňovačů, z nichž se každé díky svým vlastnostem hodí k jinému využití [4].

Jednocestný usměrňovač

Jednocestný usměrňovač (viz obr. 1.2) se skládá pouze z jedné diody. Díky propustnosti diody pouze v jednom směru je na výstupu usměrňovače pulzní napětí odpovídající kladné půlperiodě vstupního napětí.



Obrázek 1.2 Schéma jednocestného usměrňovače

Zatížitelnost diody je dána výkonem, který dokáže PN přechod vyzářit do okolí dříve, než dojde k jeho zničení vlivem vzniklého tepla. Celkový ztrátový výkon je roven součinu střední hodnoty proudu $I_{stř}$ za jednu periodu a úbytku napětí PN přechodu. Dioda tedy musí být dimenzována na proud $I_{stř}$, ačkoliv pulzní proud může být mnohem vyšší. V případě velkého proudového zatížení je vhodné umístit diodu na chladič, případně zabezpečit její chlazení vhodným distancováním od plošného spoje.

Dioda by měla být dimenzována na závěrné napětí minimálně dvojnásobné, než je špičkové napětí sekundárního vinutí transformátoru, tedy [4]:

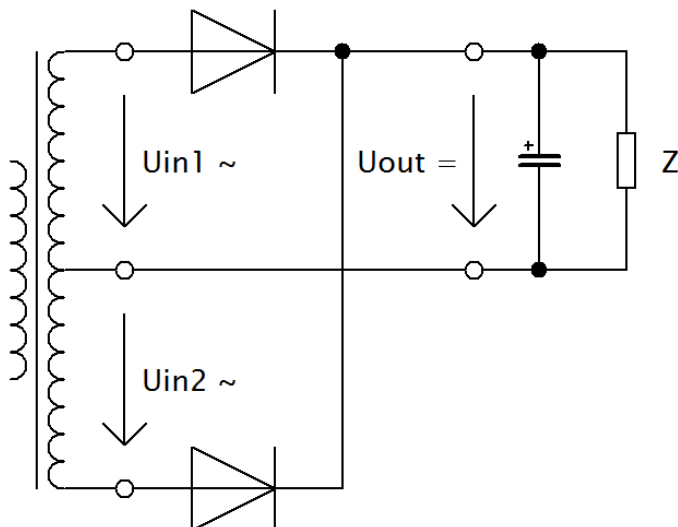
$$U_{Rmax} = 2 \cdot \sqrt{2} \cdot U_{ef} , \quad (1.2)$$

kde U_{Rmax} [V] je maximální reverzního napětí na diodě a U_{ef} [V] je efektivní hodnota sekundárního napětí na prázdko. Toto napětí je totiž na diodě přítomné v případě, že je na výstupu filtrační kondenzátor nabitý na maximální hodnotu a vstupní napětí je v protifázi.

Výhodou jednocestného usměrňovače je jeho jednoduchost a malý úbytek napětí. Nevýhodou je, že propouští pouze polovinu možného výkonu. Nehodí se tedy pro větší odběry proudu. Navíc dochází ke stejnosměrné magnetizaci jádra transformátoru.

Dvojcestný usměrňovač

Dvojcestný usměrňovač (viz obr. 1.3) se skládá z dvou diod, a na rozdíl od jednocestného usměrňovače propouští obě půlperiody vstupního napětí.



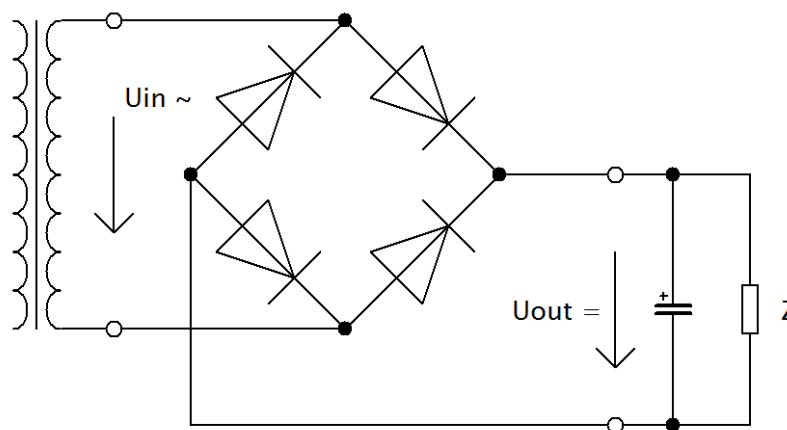
Obrázek 1.3 Schéma dvojcestného usměrňovače

Každou diodou teče pouze jedna půlperioda a není proto nutné ji dimenzovat na celkový výstupní proud. Napětově se diody dimenzují na stejné závěrné napětí, jako v jednocestném usměrňovači.

Nevýhodou tohoto zapojení je nutnost dvojitého vinutí transformátoru s vyvedeným středem, zato ale nedochází ke stejnosměrné magnetizaci jádra. Výhodou je také dvojnásobný výkon při stejném napěťovém úbytku na diodách, a tedy i malý vyzářený výkon usměrňovače.

Můstkový usměrňovač

Můstkový (Graetzův) usměrňovač (viz obr. 1.4) je zapojen ze čtyř diod. Při jedné půlperiodě teče proud pouze dvěma diodami.



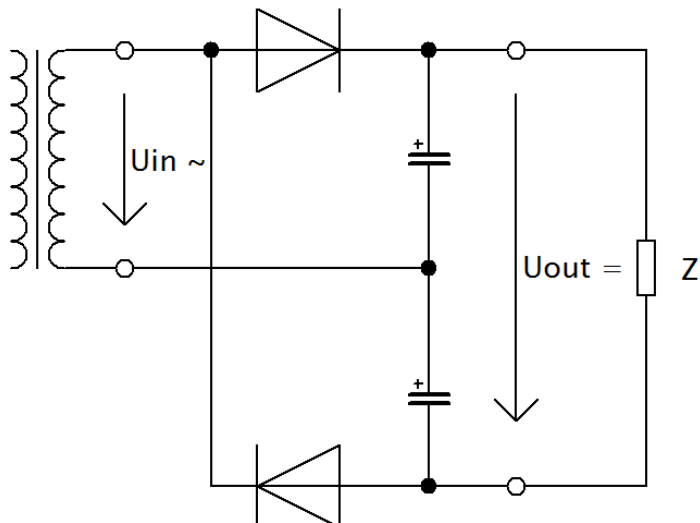
Obrázek 1.4 Schéma můstkového usměrňovače

Protože proud protéká jednou diodou pouze polovinu periody, a pro výkonové namáhání diody je klíčová střední hodnota proudu za periodu, dimenzují se všechny diody na polovinu zatěžovacího proudu. Určení závěrného napětí je složitější, protože dvě diody nemusí mít stejný závěrný odpor. Neplatí tedy, že na jedné diodě je pouze polovina výstupního napětí. Pro se i v můstkovém usměrňovači používají diody se závěrným napětím o hodnotě minimálně dvojnásobku špičkového sekundárního napětí transformátoru.

Výhodou Graetzova můstkového usměrňovače je využití kladné i záporné půlperiody bez nutnosti dvojitého sekundárního vinutí s vyvedeným středem. Zároveň nedochází ke stejnosměrné magnetizaci jádra. Hodí se proto pro velké výstupní proudy. Nevýhodou je, že proud prochází vždy dvěma diodami za sebou. Vzniká tedy větší úbytek napětí, který způsobuje tepelné ztráty, takže při vyšších výkonech může potřebovat chlazení.

Zdvojovač a násobič napětí

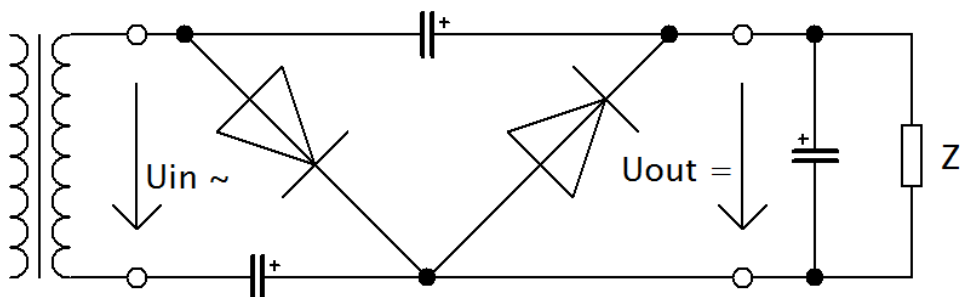
Zapojení zdvojovače (viz obr. 1.5) se skládá ze dvou jednocestných usměrňovačů s filtračním kondenzátorem, které jsou svými vstupy zapojeny paralelně, a výstupy sériově. Napětí na kondenzátorech se sčítají a výsledné napětí je dvojnásobné [4].



Obrázek 1.5 Schéma zdvojovače napětí

Zdvojovač se navrhuje stejně jako jednocestný usměrňovač. Na rozdíl od něj ale díky odběru proudu při obou půlvlnách nedochází ke stejnosměrnému sycení jádra.

Z principu zdvojovače vychází kaskádní jednocestný (Delonův) násobič. Tím je teoreticky možné mnohonásobně zvětšovat vstupní střídavé napětí, prakticky však přibližně 10x, podle počtu stupňů [4]. Dvoustupňový kaskádní násobič je na obr. 1.6.

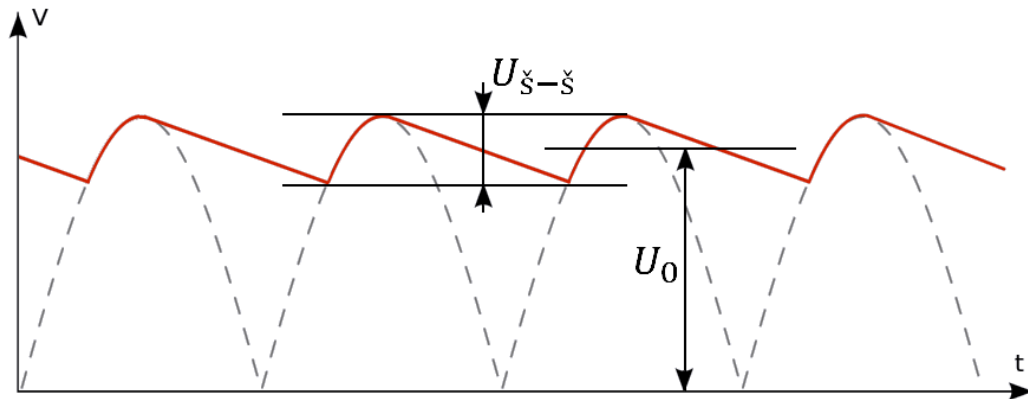


Obrázek 1.6 Scéma dvoustupňového kaskádního násobiče

Zdvojovače a násobiče napětí je vhodné použít tam, kde požadujeme velké napětí, ale malý proud. Násobiče se využívají hlavně u vysokonapěťových zdrojů, kde by konstrukce transformátoru na dané napětí byla problematická kvůli počtu závitů, a také by nesla riziko průrazu vlivem mezizávitového napětí.

1.1.3 Filtr

Pro filtraci pulzního napětí na výstupu usměrňovače se používá filtrační kondenzátor. Jeho úkolem je akumulovat elektrický náboj v době, kdy půlvlna sinusového průběhu napětí z usměrňovače dosahuje maxima. Tento náboj pak dodává do zátěže, když napětí klesá. Protože se kondenzátor nabíjí pulzně, ale proud je odebírán konstantně, vzniká na výstupním napětí zvlnění (viz obr. 1.7). Stoupající část výsledného průběhu je dána sinusoidou, klesající část odpovídá exponenciálnímu vybíjení kondenzátoru.



Obrázek 1.7 Zvlnění napětí při dvojcestném usměrnění

Výstupní zvlnění je definováno vztahem[4]:

$$p = \frac{U_{\xi-\xi}}{U_0} \cdot 100, \quad (1.3)$$

Kde p [%] je hodnota zvlnění, $U_{\xi-\xi}$ [V] je rozdíl mezi nejvyšší a nejnižší hodnotou výstupního napětí a U_0 [V] je střední hodnota výstupního napětí.

Protože exponenciálně klesající část průběhu zvlnění je velmi krátká oproti celé vybíjecí křivce kondenzátoru, dá se pro zjednodušení výpočtu považovat za lineární. Díky takto zavedenému zjednodušení lze kapacitu kondenzátoru vypočítat podle vztahu:

$$C = \frac{k \cdot I}{p \cdot U_0} \quad (1.4)$$

Kde C [μF] je kapacita kondenzátoru, I [mA] je odebíraný proud, p [%] je zvlnění a k je konstanta, která má pro jednocestné usměrnění hodnotu 600 a pro dvojcestné usměrnění hodnotu 300. Nepřesnost takto zjednodušeného výpočtu je menší než výrobní tolerance kapacity kondenzátoru [4].

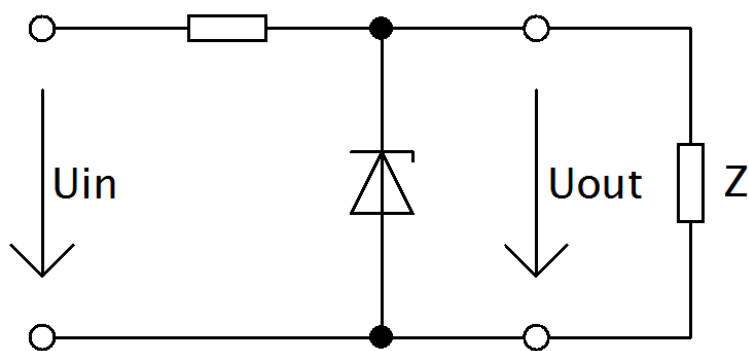
1.1.4 Stabilizátor

Stabilizátor je dvojbran, který umožňuje stabilizovat výstupní napětí nebo proud při změnách vstupního napětí, zátěže a teploty okolí. Podle vnitřních principů lze stabilizátory rozdělit na parametrické a lineární [4].

Parametrické stabilizátory

Parametrické stabilizátory využívají rozdílu mezi dynamickým a stejnosměrným odporem, nejčastěji u polovodičových součástek. Pokud je dynamický odpor v pracovním bodě řádově menší, než stejnosměrný, jedná se o stabilizátor napětí (např. Zenerova dioda). Pokud je dynamický odpor v pracovním bodě řádově větší, než stejnosměrný, jedná se o stabilizátor proudu (např. výstupní charakteristika tranzistoru) [8].

Nejtypičtějším parametrickým stabilizátorem napětí je stabilizátor se Zenerovou diodou (viz obr. 1.8). Využívá velmi strmé VA charakteristiky Zenerovy diody v závěrném směru. Zapojení je tvořeno sériovým spojením lineárního odporu a Zenerovy diody, přičemž zátěž je zapojena paralelně k diodě.

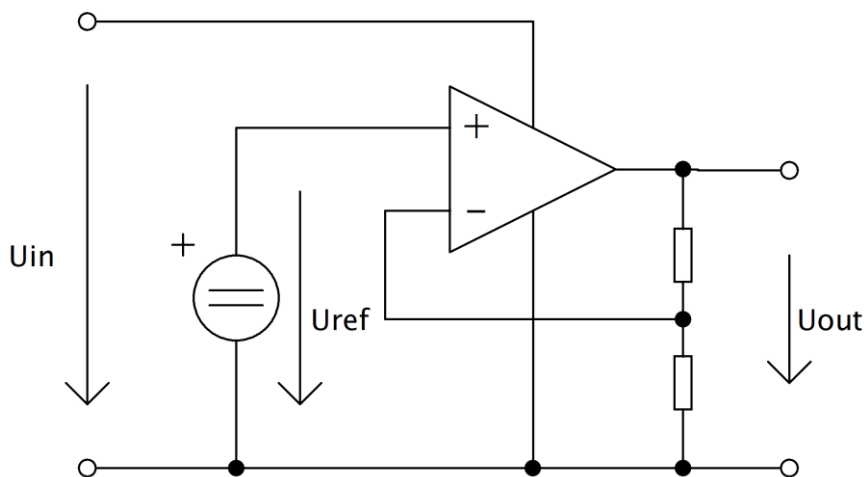


Obrázek 1.8 Stabilizátor napětí se Zenerovou diodou

Lineární stabilizátory

Lineární stabilizátory jsou založeny na napěťové referenci a zesilovači s vysokým zesílením. Výstupní napětí je shodné s referenčním, nebo jeho násobkem. Stabilizátor má snahu udržet výstupní napětí konstantní, a při jakýchkoli změnách ho díky zpětné vazbě navrátit k původní hodnotě. Ideální stabilizátor se tedy chová jako ideální zdroj napětí s nulovým vnitřním odporem [4]. Vlastnosti obvodu jsou závislé především na stabilitě referenčního napětí.

Typické zapojení stabilizátoru napětí s operačním zesilovačem je na obr. 1.9. Referenční napětí je přivedeno na neinvertující vstup. Na invertující vstup je přivedena zpětná vazba. Ta může být zavedena z výstupu přímo, nebo přes dělič napětí.



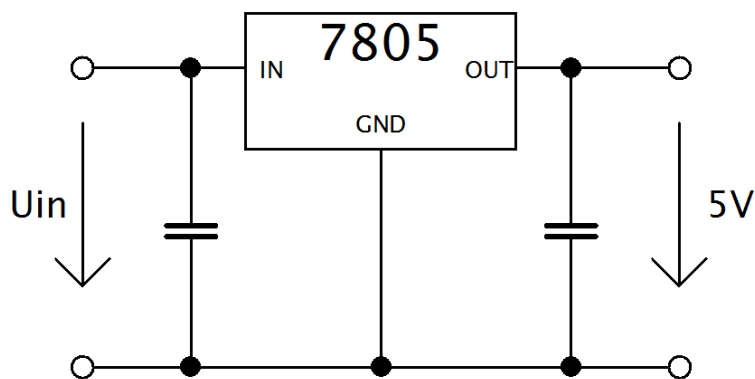
Obrázek 1.9 Zdroj napětí s operačním zesilovačem

Výstupní napětí lze měnit jednak změnou zpětné vazby, nebo přímo změnou referenčního napětí. Výstupní impedanci lze snížit například zapojením tranzistoru jako emitorového sledovače. Zpětná vazba je připojena na výstup, takže vlastnosti tranzistoru nebudou zhoršovat vlastnosti celého stabilizátoru.

Třísorkové stabilizátory

Třísorkové stabilizátory jsou integrované stabilizátory napětí, které v jednom pouzdře obsahují i proudovou a teplotní ochranu. Vyrábí se v širokém rozsahu napětí a proudů, s pevným i regulovatelným napětím, kladným či záporným. Díky jejich snadnému zapojení, dostupnosti a ceně se staly v oblasti napájecí techniky velice rozšířené.

Na obrázku 1.10 je příklad zapojení třísorkového stabilizátoru 7805, jehož výstupní napětí je 5 V. Vstupní kondenzátor je filtrační, výstupní zamezuje rozkmitání a musí být umístěn blízko stabilizátoru.



Obrázek 1.10 Zapojení stabilizátoru 7805

1.2 Spínané zdroje

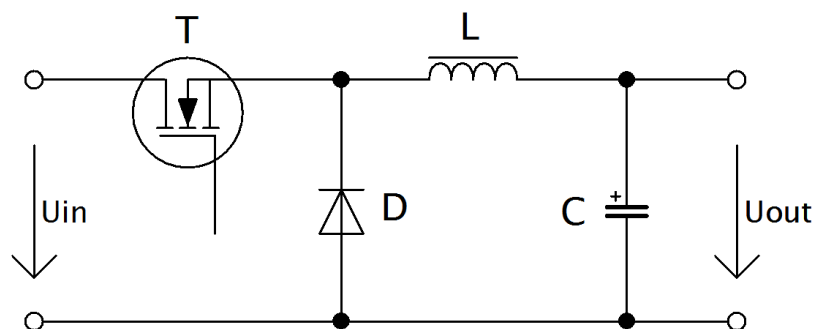
Spínané zdroje pracují na rozdíl od lineárních nespojitě. Lineární zdroj přebytečnou energii, která není spotřebována v zátěži, konstantě přeměňuje na teplo. Příkon zdroje se tak dělí mezi zdroj a zátěž. Spínaný zdroj oproti tomu používá akumulací prvek, do kterého pulzně spíná takové množství energie, kterou zátěž spotřebuje. Výhodou je tedy velká efektivita. Spínané zdroje navíc dokážou výstupní napětí i zvětšovat. Jejich nevýhodou ovšem je, že díky spínání vznikají na výstupu zdroje vyšší harmonické složky, které je nutné filtrovat. Spínané zdroje můžeme rozlišovat podle toho, jaký akumulací prvek pro svou činnost používají.

Nejjednodušší spínané zdroje používají kondenzátor. Říká se jim též nábojové pumpy. Jejich výhodou je jednoduchost a nízká cena. Hodí se však pouze pro aplikace s nízkým výkonem [5].

Druhou možností je použití indukčnosti. Rozlišujeme neizolované měniče (s cívkou) a izolované měniče (s transformátorem). Neizolované měniče neumožňují galvanické oddělení od vstupního napětí a hodí se pro střední výkony (přibližně 50W) [5]. Napětí mohou snižovat, ale i zvyšovat. Tento typ měničů se používá, pokud se vstupní a výstupní napětí liší méně než 10x. Rozlišujeme několik základních zapojení neizolovaných měničů: Snižující (buck), zvyšující (boost) a invertující měnič.

Snižující měnič (buck)

Na obrázku 1.11 je uvedeno nejzákladnější schéma snižujícího měniče. Ve schématu není uvedena ovládací část. Pokud je tranzistor sepnutý, proudí cívkou do zátěže proud přímo ze zdroje a zároveň se nabíjí kondenzátor. Cívka se chová jako spotřebič a akumuluje se v ní energie. Dioda je polarizována v závěrném směru, a neprotéká jí žádný proud. Při rozepnutí tranzistoru se obrací polarita napětí na cívce, která začne spolu s kondenzátorem C dodávat do zátěže proud. Obvod se uzavírá přes diodu, která je nyní otevřená. Výhodou zapojení je jeho jednoduchost, nevýhodou je omezený výkon a možnost zničení tranzistoru při zkratu na výstupu.

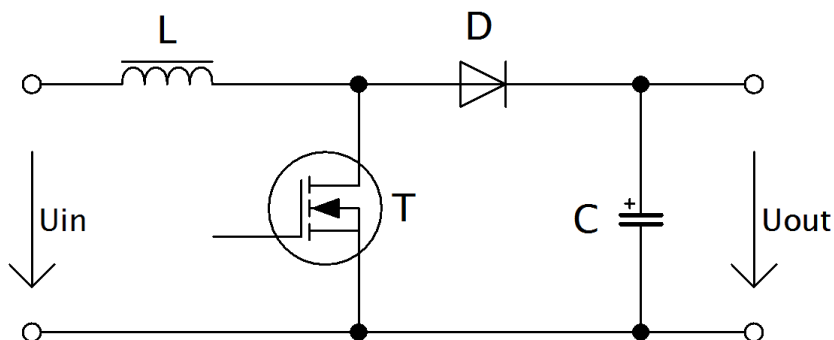


Obrázek 1.11 Snižující měnič

Zvyšující měnič (boost)

Základní schéma zvyšujícího měniče je na obrázku 1.12. Ovládací část opět není uvedena. Během doby sepnutí tranzistoru roste proud cívkou, která se chová jako spotřebič a akumuluje v sobě energii. V této době dodává proud do zátěže kondenzátor.

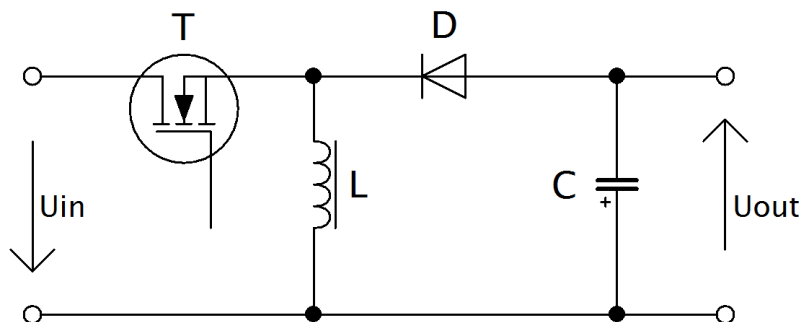
Dioda je uzavřená. Po rozeptnutí tranzistoru se cívka chová jako zdroj v sérii s napájecím napětím. Dioda je otevřená a proud teče do zátěže. Zároveň se nabíjí kondenzátor. Dioda zároveň slouží k tomu, aby se v první fázi přes tranzistor nevybíjel kondenzátor. Výhodou je jednoduchost a možnost zvýšení napětí bez použití transformátoru, nevýhodou je omezený výkon a poměrně vysoké zvlnění [5].



Obrázek 1.12 Zvyšující měnič

Invertující měnič

Jak název napovídá, invertující měnič (viz obr. 1.13) slouží k obrácení polarity vstupního napětí bez galvanického oddělení. Pokud je tranzistor sepnutý, teče přes cívku proud ze zdroje. Cívka se chová jako spotřebič a akumuluje v sobě energii. V této fázi dodává do zátěže proud kondenzátor. Po rozeptnutí tranzistoru se cívka chová jako zdroj a udržuje proud ve stejném směru, ale napětí se obrací. Z cívky teče proud do zátěže a zároveň se nabíjí kondenzátor. Dioda uzavírá obvod.

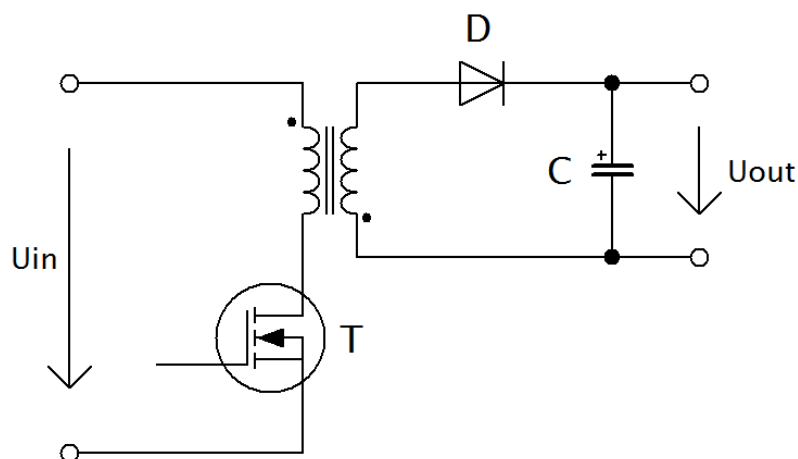


Obrázek 1.13 Invertující měnič

Pokud požadujeme větší výkon, galvanické oddělení nebo více různých galvanicky oddělených výstupních napětí, je nutné místo cívky použít transformátor. Kompromisem mezi cívkou a transformátorem může být cívka s odbočkou, neboli autotransformátor. Lze ji použít tam, kde není požadováno galvanické oddělení vstupu a výstupu. Mezi základní zapojení s transformátorem patří blokující měnič (flyback) a propustný měnič (forward). Princip jejich zapojení vychází z neizolovaných měničů.

Blokující měnič (flyback)

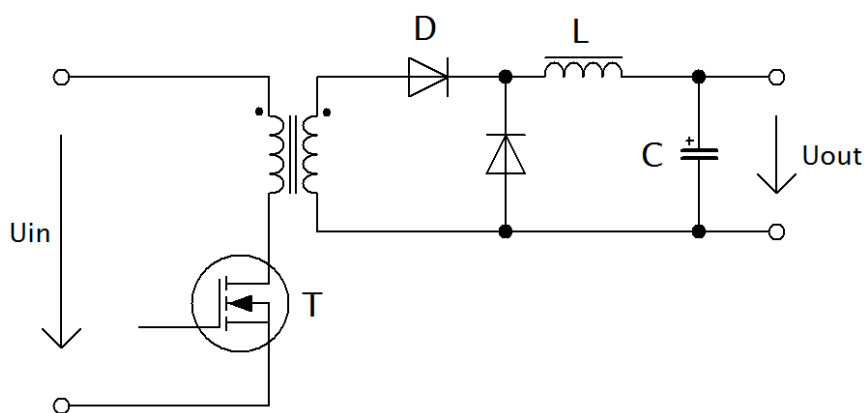
Na obrázku 1.14 je nejjednodušší zapojení blokujícího měniče s transformátorem. Je založeno na zapojení invertujícího měniče, ale místo tlumivky je použit transformátor který odděluje vstupní a výstupní část obvodu. Výhodou tohoto měniče je jeho jednoduchost, nevýhodou je výkon omezený akumulační schopností materiálu jádra transformátoru. Tranzistor je také nutné chránit proti průrazu vlivem napětí, které vzniká na primárním vinutí transformátoru při rozpojení tranzistoru.



Obrázek 1.14 Blokující měnič

Propustný měnič (forward)

Propustný měnič (viz obr. 1.15) vychází ze snižujícího měniče (buck). Na rozdíl od blokujícího měniče je výkon do zátěže dodáván přímo při sepnutém tranzistoru, takže transformátor může být menší při větším přenášeném výkonu. Tím pádem ale není při rozepnutí tranzistoru z transformátoru odebírána energie a hrozí zničení tranzistoru vlivem rostoucího napětí. Proto je nutné transformátor ve vypnuté fázi demagnetizovat. To se dá provést např. pomocí Zenerovy diody, nebo pomocného demagnetizačního vinutí (na schématu není uvedeno).



Obrázek 1.15 Propustný měnič

1.2.1 Srovnání zdrojů

Srovnání důležitých parametrů lineárních a spínaných zdrojů je v tabulce 1 podle [7].

Tabulka 1 Srovnání lineárních a spínaných zdrojů

Parametr	Jednotka	Lineární zdroj	Spínaný zdroj
Poměr výkon/váha	[W/kg]	20	100
Poměr výkon/objem	[W/cm ³]	0,05	0,2
Účinnost	[%]	40 - 50	>80
Výstupní zvlnění	[mV]	5	50
Výstupní šum	[mV]	50	200
Odezva na skokovou změnu zátěže	[ms]	0,02	1
Doba náběhu	[ms]	2	20
Cena		prudce stoupá s výkonem	mírně stoupá s výkonem

Z tohoto srovnání je patrné, že s ohledem na cenu, váhu i velikost jsou jednoznačně výhodnější spínané zdroje. Ovšem s ohledem na kvalitu a stabilizaci výstupního napětí dosahují lepších výsledků zdroje lineární.

1.3 Digitální řízení

1.3.1 A/D převodníky

A/D převodník, nebo také ADC (analog-to-digital converter) je obvod, který převádí spojitou hodnotu vstupního signálu, nejčastěji napětí, na diskrétní číselnou hodnotu. V převodníku A/D dochází ke kvantování vstupního signálu [2].

Výstupní číselná hodnota tedy může nabývat pouze určitého počtu stavů, které odpovídají kvantovacím hladinám vstupní hodnoty. Vzdálenost kvantovacích hladin je ve většině případů rovnoměrně rozdělena přes celý vstupní rozsah, který je dán referenčním napětím. Počet kvantovacích hladin odpovídá počtu možných kombinací výstupního čísla. Podle způsobu převodu spojitě veličiny na nespojitou dělíme A/D převodníky na komparační a integrační.

Komparační převodníky převádějí na číslo okamžitou hodnotu vstupního napětí. Převod vyžaduje, aby napětí na vstupu bylo v čase převodu konstantní. K tomu se využívají vzorkovače. Tyto převodníky dosahují nejvyšší rychlosti převodu a používají se proto ve spektrálních analyzátoch, osciloskopech a dalších zařízeních, kde je důležité zachytit rychlý průběh signálu.

Integrační převodníky převádějí na číslo průměrnou hodnotu napětí za určitý čas. Díky tomu je potlačen vliv rušivých signálů, například šumu. Také není nutné vzorkování vstupního signálu. Integrační převodníky jsou z principu pomalejší a hodí pro použití spíše tam, kde je není primární zachycení časového průběhu signálu [2].

Dále lze A/D převodníky rozdělit podle rozsahu akceptovatelných vstupních napětí na unipolární a bipolární. Unipolární pracují s hodnotami napětí 0 až U_R , zatímco bipolární pracují v rozsahu $-U_R$ až U_R .

1.3.2 D/A převodníky

D/A převodník, nebo také DAC (digital-to-analog converter) je obvod, který převádí vstupní číslicovou hodnotu na analogovou veličinu, nejčastěji napětí. Vstupní hodnota je n -bitové číslo vyjádřené nejčastěji binárním, případně BCD kódem.

D/A převodníky používají pro svou funkci analogové spínače. Odpor spínače v sepnutém stavu by se měl blížit nule, zatímco v rozepnutém stavu by se měl blížit k nekonečnu. Kvalita převodníku závisí hlavně na kvalitě těchto spínačů a stabilitě referenčního napětí.

Podle rozsahu vstupního a výstupního napětí lze D/A převodníky rozdělit na unipolární, bipolární, dvoukvadrantové a čtyřkvadrantové. Dvou a čtyřkvadrantové převodníky lze využít jako zesilovače s číslicově nastavitelným zesílením.

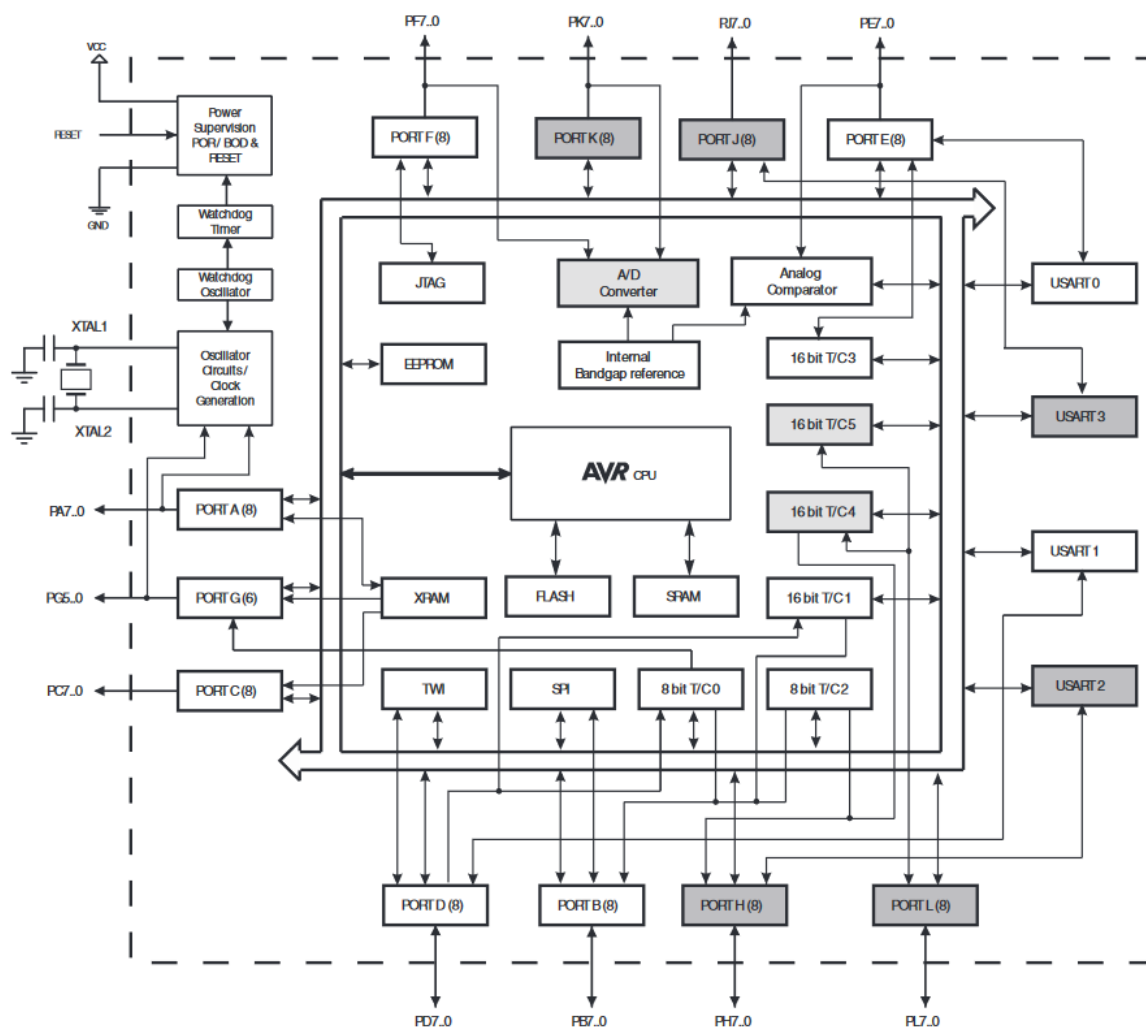
Nejpoužívanějším typem převodníků jsou podle způsobu vnitřní funkce paralelní převodníky. Princip je založený na společném zdroji referenčního napětí U_r a sítě rezistorů, pomocí kterých se získají odstupňované zdroje proudu. Ty se pak podle číslicového vstupu pomocí spínačů připojují na výstup a sčítají, případně převádí na napětí.

Mezi méně běžné D/A převodníky patří sériové a nepřímé převodníky. Sériové převodníky jsou založeny na principu postupného kvantování referenčního napětí a

sčítání váhových kvant. Nepřímé převodníky využívají mezipřevodu vstupního čísla na pomocnou veličinu, která se následně převádí na veličinu výstupní. Typicky se používá mezipřevod s PWM [2].

1.3.3 Mikrokontrolér ATmega2560

ATmega2560 je 8-bitový mikrokontrolér od firmy Atmel. V jednom pouzdře obsahuje mikroprocesor jeden šestibitový a deset osmibitových vstupně-výstupních portů, tedy celkem 86 plně programovatelných pinů. Dále má integrovanou 256 kB Flash paměť, 8 kB SRAM paměť a 4 kB EEPROM paměť. Obsahuje dva 8-bitové a čtyři 16-bitové čítače/časovače s nastavitelnou předděličkou a real-time čítač. Dva výstupy mohou pracovat v režimu PWM rozlišením 8 bitů. 12 výstupů může pracovat v režimu PWM s nastavitelným rozlišením v rozmezí 2 až 16 bitů. Integrovaný 10-bitový převodník má celkem 16 kanálů. Na obrázku 1.16 je uvedeno blokové schéma tohoto mikrokontroléru.



Obrázek 1.16 Blokové schéma mikrokontroléru ATmega2560 [1]

Zpracování analogových signálů

Mikrokontrolér ATmega2560 umožňuje zpracování vstupních analogových signálů za pomoci interních periférií, a to 10-bitového A/D převodníku a komparátoru.

10-bitový A/D převodník má celkem 16 kanálů umístěných na portech PF a PK. V jednom okamžiku je však možné provádět převod pouze jednoho vstupního kanálu. Analogová úroveň může být vztažena ke GND, nebo je možné převádět diferenční hodnotu dvou kanálů včetně nastavitelného zesílení. Jako referenční napětí lze zvolit interní referenci 2,56 V, nebo externí referenci přivedenou na pin AREF.

Integrovaný komparátor porovnává vstupní úrovně dvou signálů přivedených na piny PE3 a PE2. Při změně výstupu komparátoru může být generováno přerušení [1].

Sériová komunikace

Součástí mikrokontroléru ATmega2560 je rozhraní pro několik druhů sériové komunikace.

Rozhraní USART (Universal Synchronous /Asynchronous Receiver Transmitter) umožňuje sériovou komunikaci mezi dvěma zařízeními. U mikrokontroléru ATmega2560 je možné připojit až 4 rozhraní USART, a to na porty PE, PJ, PH a PD. Tato sériová komunikace umožňuje přenos v duplexním režimu, tj. zároveň přijímat i vysílat data. V asynchronním režimu může mikrokontrolér pracovat jako master i slave. Rozšířením aplikace UART může být rozhraní RS-232. V tomto rozhraní je log. 0 a log. 1 vyjádřena pomocí napěťových úrovní ± 12 V z důvodu vyšší odolnosti proti rušení. Je tedy nutné použít externí převodník úrovní.

Komunikace I²C, nebo též TWI (Two-wire serial Interface) umožňuje komunikaci až 128 zařízení pomocí dvou obousměrných vodičů. Jeden vodič slouží pro přenos dat, druhý jako hodinový signál. V klidovém stavu jsou oba signály ve vysoké úrovni díky pull-up rezistorům. Nízká úroveň je generována pouze v případě, že jedno nebo více zařízení nastaví svůj výstup na log. 0. Každé zařízení musí mít přidělenou individuální 7-bitovou adresu. Tento typ komunikace neumožňuje duplexní přenos. U mikrokontroléru ATmega2560 je toto rozhraní připojeno na piny PD1 a PD0.

Sériová komunikace prostřednictvím rozhraní SPI (Serial Peripheral Interface) umožňuje duplexní přenos pomocí 4 a více vodičů: SCK (hodinový signál), MOSI (Master out Slave in), MISO (Master in Slave out), a signální vodič, pomocí kterého se vybírá zařízení, se kterým zrovna probíhá komunikace. [1]

2 NÁVRH A KONSTRUKCE ZDROJE

Při hodnocení parametrů laboratorních zdrojů je kladen důraz zejména na stabilitu výstupního napětí a rychlou odezvu na změnu zátěže. Fyzické vlastnosti jako váha nebo rozměry nejsou ve srovnání s elektrickými vlastnostmi tak důležité, protože zdroj je zřídka kdy potřeba přenášet. Z těchto důvodů byla zvolena koncepce lineárního stabilizátoru. Tepelné ztráty, které by vznikaly v důsledku malé účinnosti lineárního regulátoru při velkém rozdílu vstupního a výstupního napětí, jsou omezeny použitím dvou totožných sekundárních vinutí transformátoru, které lze podle požadovaného vstupního napětí spojit sériově nebo paralelně.

Z důvodu univerzálnosti a snadné implementace úprav či řešení možných závad byla zvolena modulární konstrukce. Oba zdroje jsou konstruovány jako samostatné, avšak totožné a zaměnitelné desky, které obsahují všechny části nutné svou vlastní funkci a komunikaci s okolím. Obě desky zdrojů jsou pomocí konektorů kolmo zasunuty přímo do základové desky, která jim poskytuje potřebná pracovní napětí. Dále umožňuje libovolné kombinování výstupů zdrojů pomocí relé. Komunikace ze základní desky (také označována jako „Motherboard“) je dále vedená do desky mikrokontroléru, kterým je celý zdroj řízen.

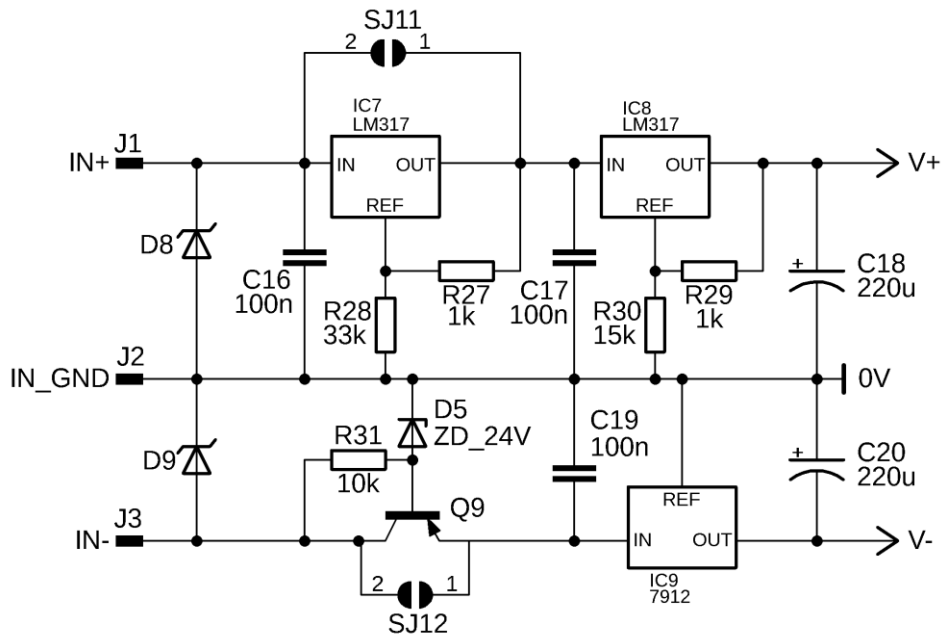
2.1 Deska zdroje

Deska zdroje byla navrhována s ohledem na co největší univerzálnost a použitelnost nikoliv pouze pro účely této konstrukce, ale i v řadě dalších aplikací. Kompletní schéma desky zdroje je uvedeno v příloze č. 1. Na desce je umístěn lineární regulátor napětí s proudovým omezením včetně signalizace. Deska obsahuje stabilizátory kladného i záporného napájecího napětí pro operační zesilovače a pro logické obvody. Výstupní proud a napětí lze nastavovat digitálně pomocí D/A převodníku, nebo analogově pomocí potenciometrů. Výstupní veličiny a teplotu lze měřit pomocí A/D převodníku, nebo pomocí externích měřidel. Převodníky komunikují s mikrokontrolérem přes galvanicky oddělenou I2C sběrnici. Výstupní napětí je možné modulovat pomocí externího signálu PWM. Jednotlivé dílčí části celého zapojení jsou dále podrobněji rozebrány.

2.1.1 Napájení

Operační zesilovače použité v zapojení vyžadují pro svou funkci jak kladné, tak záporné napětí. Tato napájecí napětí by měla být stabilní, aby jejich změna neovlivňovala výstupní napětí OZ. Rozdíl kladného a záporného napětí může být maximálně 36 V.

Při paralelně spojených sekundárních vinutí transformátoru a maximálním odebíraném proudu klesá zvlněné napětí na filtračních kondenzátorech až na hodnotu 26 V. Při sériově spojených sekundárních vinutích transformátoru a nulovém proudu roste toto napětí až k hodnotě 70 V. Hodnota kladného napájecího napětí pro OZ byla tedy zvolena 20 V, aby bylo možné zvlnění úplně odstranit. Velikost záporného napájecího napětí pro OZ byla zvolena -12 V. Schéma celého napájecího obvodu je na obrázku 2.1.



Obrázek 2.1 Schéma napájení operačních zesilovačů

Jako regulační prvek byl pro svou jednoduchost a dostupnost zvolen lineární integrovaný stabilizátor s nastavitelným napětím LM317. Maximální rozdíl mezi vstupním a výstupním napětím tohoto stabilizátoru je pouze 40 V, bylo tedy nutné použít dva stabilizátory v kaskádním zapojení. Výstupní napětí stabilizátoru IC7 je pomocí rezistorů R27 a R28 nastaveno na hodnotu 40 V. V případě použití zdroje v aplikaci, dvojestupňová regulace napětí není nutná, lze pro ušetření součástek připojit vstupní kladné napětí skrz jumper SJ11 přímo na vstup stabilizátoru IC8, jehož výstupní napětí je pomocí rezistorů R29 a R30 nastaveno na finálních 20 V. Kondenzátory C16, C17 a C18 slouží k zajištění stability obou stabilizátorů.

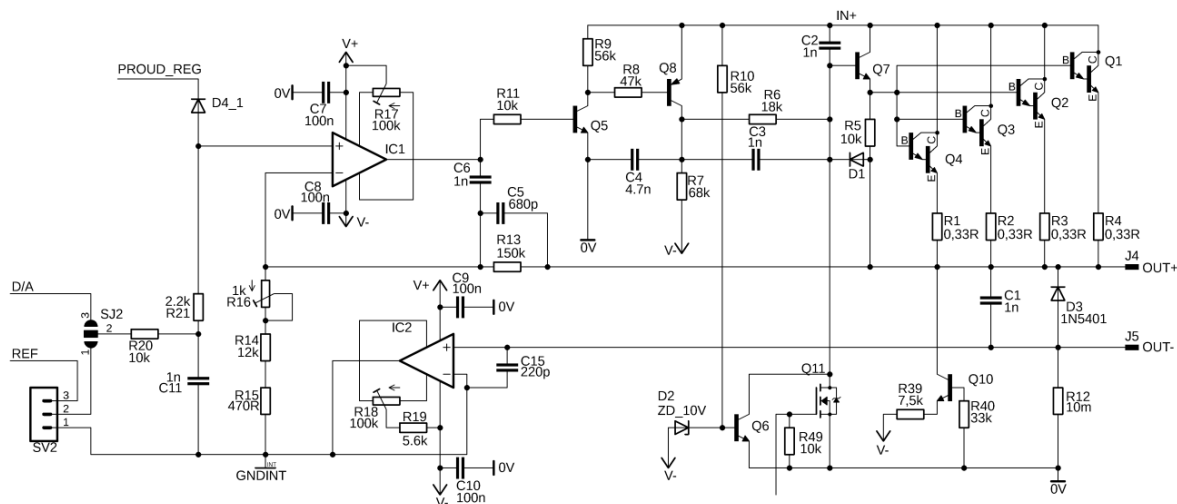
Záporné napájecí napětí -12 V je získáváno pomocí lineárního integrovaného stabilizátoru s pevným napětím 7912. Vstupní napětí pro tento stabilizátor je snižováno na maximální hodnotu -23,3 V pomocí stabilizátoru se zenerovou diodou a tranzistorem Q9. V případě použití zdroje v aplikaci, dvojestupňová regulace napětí není nutná, lze vstupní záporné napětí připojit skrz jumper SJ12 přímo na vstup stabilizátoru IC9. Kondenzátory C19 a C20 slouží pro zajištění stability stabilizátoru.

Vstupy zdroje pro kladné i záporné napětí jsou chráněny proti přepětí nebo přepólování pomocí transilů D8 a D9.

Z napájení operačních zesilovačů 20 V je dále pomocí lineárního integrovaného stabilizátoru 7805 odvozeno napětí 5 V pro logické obvody a napětěvou referenci. Toto napětí je však vztaženo k záporné výstupní svorce zdroje.

2.1.2 Regulace napětí

Část zapojení sloužící k regulaci výstupního napětí zdroje je uvedena na obrázku 2.2. Skládá se z operačního zesilovače v neinvertujícím zapojení se zpětnou vazbou na výstup zdroje, napěťového zesilovače, proudového zesilovače, a ochranných obvodů.



Obrázek 2.2 Napěťová regulace

Základem zapojení je operační zesilovač IC1, který zesiluje referenční napětí přiváděné na neinvertující vstup. Napěťové zesílení K_U je dáno poměrem děliče napětí ve zpětné vazbě, který se skládá z rezistorů R13 a sériové kombinace rezistorů R14, R15 a R16. R16 je víceotáčkový trimr, kterým lze doladit zesílení celého zapojení a kompenzovat tak výrobní toleranci pevných rezistorů. Platí vztah:

$$K_U = \frac{U_{out}}{U_{ref}} = 1 + \frac{R_{13}}{R_{14} + R_{15} + R_{16}} \quad (4.1)$$

Napěťová reference U_{ref} byla zvolena 4,096 V. Požadované výstupní napětí U_{out} je 50 V + tolerance pro softwarové doladění. Zesílení K_u je tedy 12,5. Rezistor R13 byl zvolen 150 kΩ, rezistor R14 12 kΩ, rezistor R15 470 Ω a trimr R16 41 kΩ. Zesílení tak lze při použití rezistorů s tolerancí 1% doladit na žádanou hodnotu i při maximální odchylce odporů od jmenovité hodnoty. Víceotáčkový trimr R17 slouží k nulování vstupní nesymetrie IC1 a tedy i výstupního offsetu.

Výstupní proud je zesílen emitorovým slepovačem s darlingtonovými tranzistory Q1 - Q4. Paralelní kombinace výstupních tranzistorů byla zvolena kvůli lepšímu odvodu tepelných ztrát do chladiče. Navržená deska umožňuje připojení až 4 paralelních tranzistorů. Rezistory R1 - R4 slouží pro vyrovnání proudů jednotlivými tranzistory. Proud do bází výkonových tranzistorů je zesilován tranzistorem Q7.

Tranzistory v zapojení emitorového sledovače však zesilují pouze proud, nikoliv napětí. Maximální napětí, které je operační zesilovač na vstup emitorového sledovače schopný dodat, je menší, než jeho napájecí napětí. Napětí je tedy potřeba zesílit. Toho je dosaženo pomocí dvou tranzistorů Q5 a Q8 v kaskádním zapojení se společným kolektorem. Celý napěťový zesilovač tak neobrací fázi vstupního napětí.

Kondenzátory C4, C5 a C6 zajišťují stabilitu celého zapojení. Jejich hodnota byla odladěna v obvodovém simulátoru s ohledem na stabilitu a rychlost reakce na změnu zátěže, referenčního napětí a napájecího napětí. Kondenzátory C2 a C3 omezují vysokofrekvenční rušení a záskoky, a zvyšují tak stabilitu zapojení.

Operační zesilovač IC2 je zapojený jako sledovač napětí. Vytváří stejný napěťový potenciál jako je na záporné výstupní svorce zdroje. Díky tomu je možné použít tento potenciál jako společnou zem pro děliče výstupního napětí, stejně jako pro digitální obvody, aniž by se proudy, které těmito obvody protékají, přičítaly k proudu protékajícímu zátěží, a ovlivňovaly tak přesné měření tohoto proudu na bočníku R12. Tento napěťový potenciál je dále označován jako GNDint. Pomocí víceotáčkového trimru R18 je možné kompenzovat výstupní offset tohoto operačního zesilovače. Kondenzátor C15 slouží k omezení záskoků.

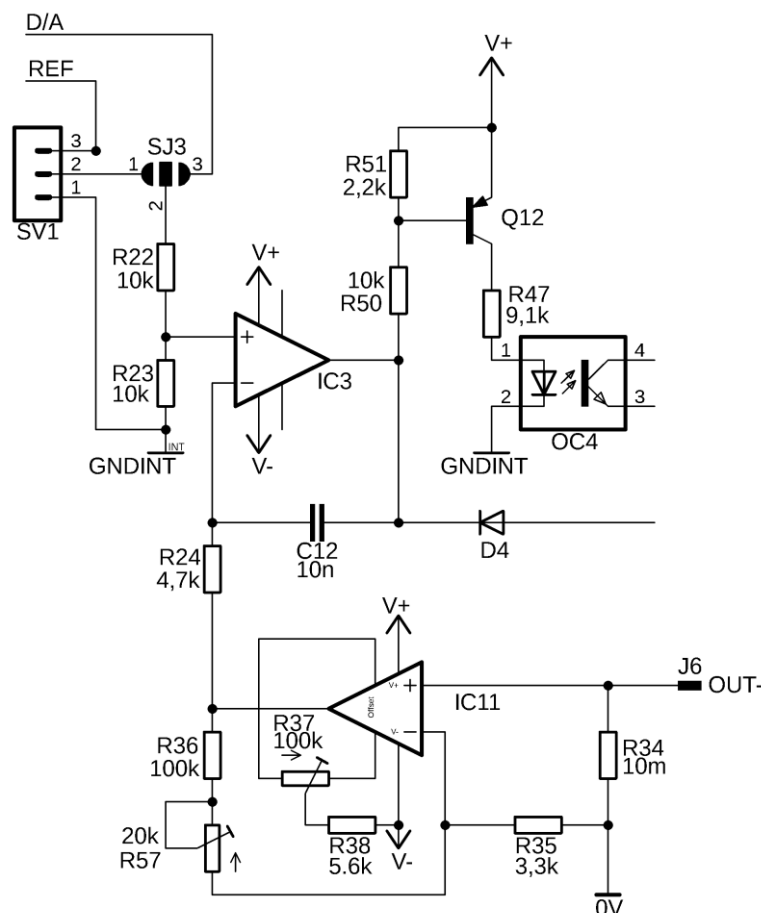
Tranzistor Q10 spolu s rezistory R39 a R40 tvoří proudovou noru, která z výstupu zdroje odebírá stálý proud při jakémkoliv výstupním napětí. To zabezpečuje stabilitu zdroje i při zcela odpojené zátěži, protože zdroj nikdy nepracuje bez zátěže.

Tranzistor Q6 udržuje výstupní napětí na nule při nepřítomnosti záporného napájecího napětí. Tím zabraňuje přechodným jevům při zapínání a vypínání zdroje, a navíc brání nesprávné funkci zdroje při závadě na zdroji záporného napětí, který je pro jeho funkci klíčový. Při přítomnosti záporného napětí většího než Zenerovo napětí diody D2, které bylo zvoleno 10 V, se tranzistor T5 uzavře a umožní zvýšení napětí na bázi tranzistoru Q7 a tedy správnou funkci zdroje. Stejného efektu jako při otevření Tranzistoru Q6 lze dosáhnout také pomocí tranzistoru Q6 typu N-MOSFET. Ten je možné spínat externě. Výstupní napětí zdroje lze tedy skokově snížit na nulu, aniž by bylo třeba měnit referenční napětí. Toho je možné využít například k PWM modulaci.

Referenční napětí pro operační zesilovač IC1 může být získáváno z D/A převodníku, nebo pomocí potenciometru připojeného na svorku SV2. Zdroj tedy lze řídit digitálně i analogově. Volba se provádí pomocí spojení kontaktů jumperu SJ2. Referenční napětí pro D/A převodník i potenciometr je získáváno z jedné napěťové reference 4,096 V.

2.1.3 Proudové omezení

Část zapojení sloužící k omezení výstupního proudu zdroje je uvedena na obrázku 2.3.



Obrázek 2.3 Schéma proudového omezení

Rezistor R34 je zapojený v sérii se zátěží, a protéká jím tedy stejný proud. V důsledku protékajícího proudu vzniká na tomto rezistoru úbytek napětí, které lze měřit. Odpor rezistoru R34 byl zvolen 10 mΩ. Při maximálním proudu 6 A na něm tedy bude napětí 60 mV a ztrátový výkon pouze 0,36 W.

Napětí na bočníku má vzhledem k záporné výstupní svorce zdroje zápornou polaritu. Pro účely měření A/D převodníkem je tedy potřeba jej nejen zesílit, ale i obrátit jeho polaritu na kladnou hodnotu. K tomu slouží operační zesilovač IC11 v invertujícím zapojení. Při napětí na bočníku $U_{in} = -60$ mV požadujeme výstupní napětí OZ $U_{out} = 2,048$ V, což je pevné referenční napětí použitého A/D převodníku. Pro zesílení platí vztah:

$$K_U = \frac{U_{out}}{U_{in}} = -\frac{R_{36} + R_{57}}{R_{35}} \quad (4.2)$$

Požadované zesílení K_U je tedy -33,3. Odpor rezistoru R35 volíme 3,3 kΩ a odpor

rezistoru R36 volíme 100 k Ω . R57 je víceotáčkový trimr, kterým lze doladit zesílení celého obvodu a tím kompenzovat výrobní nepřesnost použitých rezistorů. Rezistor R38 a víceotáčkový trimr R37 slouží k nulování offsetového napětí operačního zesilovače IC11.

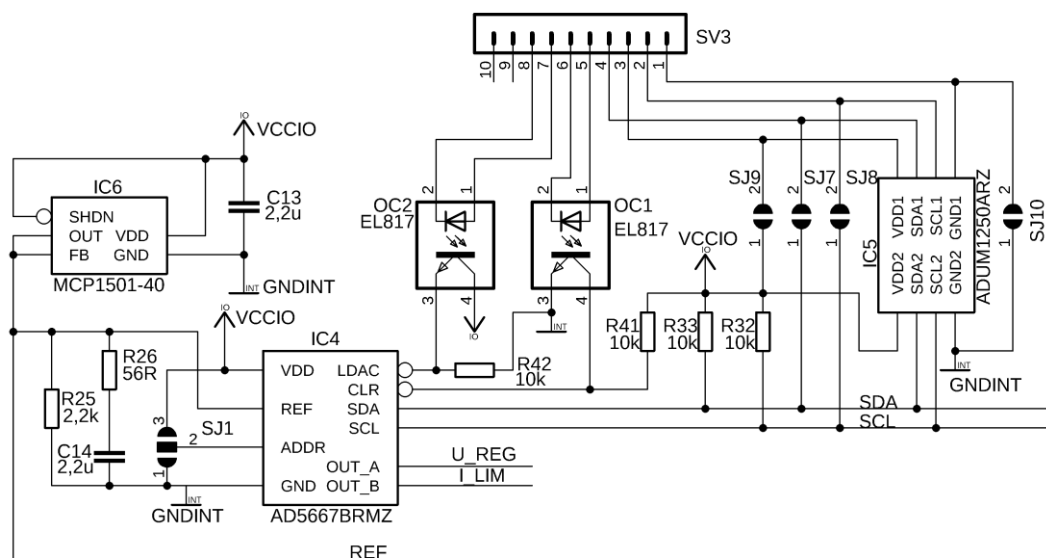
Samotnou funkci proudového omezení zajišťuje operační zesilovač IC3, který je zapojený jako komparátor. Porovnává zesílené napětí na bočníku R34 s referenčním napětím, které udává velikost maximálního proudu. Maximální referenční napětí je 4,096 V. Je tedy třeba jej snížit na poloviční hodnotu pomocí děliče napětí z rezistorů R22 a R23. Pokud zátěží protéká menší než maximální nastavený proud, je referenční napětí na neinvertujícím vstupu OZ větší, než napětí na invertujícím vstupu. Výstup je tedy v kladné saturaci, dioda D4 je uzavřená, a obvod proudového omezení nijak neovlivňuje obvod napět'ové regulace. Pokud zátěží teče větší než maximální nastavený proud, je napětí na invertujícím vstupu OZ větší, než referenční napětí na neinvertujícím vstupu, a výstup OZ se překlápí do záporné saturace. Dioda D4 je polarizována v propustném směru, a tedy přímo snižuje referenční napětí napět'ové regulace. Výstupní napětí zdroje klesá, a tím pádem klesá i proud zátěží. Obvod se ustálí v momentě, kdy je referenční napětí na invertujícím vstupu IC3 stejné, jako zesílené napětí z bočníku, tedy když zátěží protéká požadovaný proud. Kondenzátor C12 zpomaluje rychlost změny výstupního napětí IC3 a tím zajišťuje stabilitu celého zapojení.

Referenční napětí pro proudové omezení, stejně jako u napět'ové regulace, je odvozeno od napět'ové reference 4,096 V, a lze jej získávat buď skrz D/A převodník, nebo pomocí potenciometru připojeného na svorku SV1. Maximální proud lze tedy nastavovat buď digitálně, nebo analogově. Volba se provádí spojením kontaktů jumperu SJ3.

Signalizaci stavu proudové limitace zajišťuje tranzistor Q12 s galvanickým oddělením optočlenem OC4. Pokud zátěží teče menší než maximální nastavený proud, a obvod proudového omezení tedy neovlivňuje výstupní napětí, je na výstupu operačního zesilovače IC3 maximální kladné napětí, a bázi tranzistoru Q12 tedy neprotéká žádný proud. Pokud je obvod proudové limitace aktivní, napětí na bázi tranzistoru Q12 klesne, bázi začne protékat proud a tranzistor se otevře. Diodou v optočlenu začne protékat proud, a tím se otevře tranzistor optočlenu. Zpracování tohoto signálu je dále řešeno obvody mimo desku zdroje.

2.1.4 Digitální řízení

Výstupní napětí a maximální proud je možné řídit digitálně pomocí D/A převodníku. Pro tyto účely byl zvolen převodník AD5667BRMZ od firmy Analog Devices. Tento převodník má 2 samostatné kanály s rozlišením 16 bitů, a s mikroprocesorem komunikuje pomocí I2C sběrnice. Schéma řídicí části s D/A převodníkem je na obrázku 2.4.



Obrázek 2.4 Schéma řídicí části

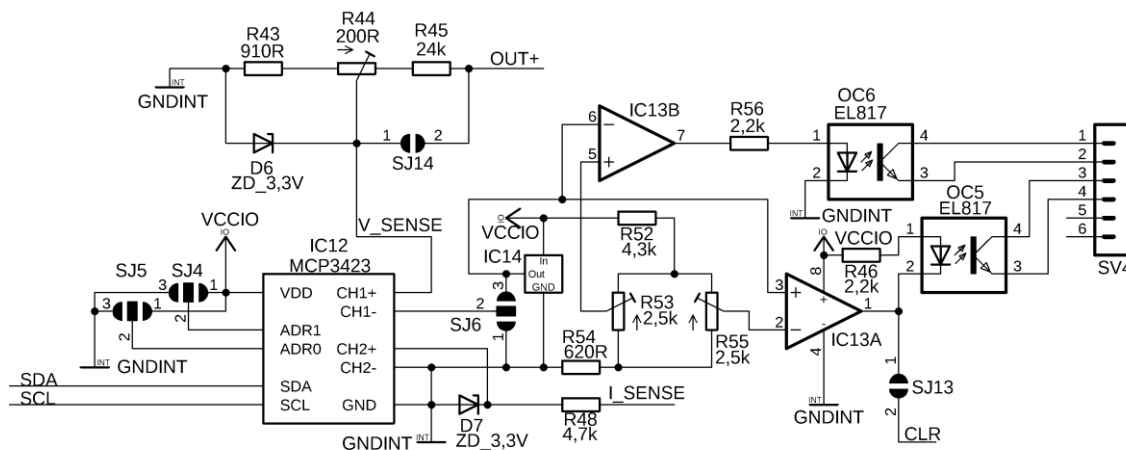
Integrovaný obvod IC5 slouží ke galvanickému oddělení I2C sběrnice. Při použití zdroje v aplikaci, kde není galvanické oddělení nutné, lze tento obvod vynechat, a vstupy propojit přímo pomocí jumperů SJ7 – SJ10.

D/A převodník disponuje dvěma řídicími vstupy CLR a LDAC. Vstup CLR při logické nule vymaže datové registry obou výstupních kanálů, a tedy sníží napětí na nulu. Za běžného stavu je tato volba neaktivní díky pull up rezistoru R41, lze ji však aktivovat externě skrz optočlen OC1. Vstup LDAC je aktivní při logické nule. Při své aktivaci umožňuje aktualizovat nově zapsané hodnoty v datových registrech na výstupy převodníku. Tato volba je permanentně aktivní díky pull down rezistoru R42, lze ji však deaktivovat aktivací optočlenu OC2. Toho je možné využít například jako pozdržení nastavení nových hodnot, pokud je požadována současná změna více parametrů zdroje či více zdrojů, což by kvůli rychlosti sériové komunikace nebylo možné. Vstup ADDR má 3 možné stavy, a slouží k nastavení posledních dvou bitů adresy D/A převodníku. Je možné jej připojit ke GND, napájecímu napětí, nebo jej nechat odpojený. Tuto volbu lze učinit pomocí spojení příslušných plošek jumperu SJ1.

Tento typ D/A převodníku nedisponuje integrovanou napěťovou referencí, je proto nutné použít referenci externí. K tomuto účelu byl zvolen integrovaný obvod MCP1501-40 od firmy Microchip technology, který poskytuje referenční napětí 4,096 V s přesností 0,1 %. Zapojení vychází z doporučení výrobce pro použití jako reference D/A převodníků.

2.1.5 Digitální měření

Měření výstupního napětí a proudu zdroje probíhá pomocí A/D převodníku IC12. K tomuto účelu byl zvolen integrovaný obvod ADS1112IDGST od firmy Texas Instruments. Schéma měřicí části obvodu je na obrázku 2.5.



Obrázek 2.5 Schéma digitálního měření

A/D převodník ADS1112IDGST Umožňuje dvoukanálové měření s diferenciálními vstupy, nebo tříkrálové měření se společnou zemí. Měřená napětí jsou v převodníku porovnávána s integrovanou napěťovou referencí 2,048 V. Externí napěťovou referenci nelze použít. Komunikace s převodníkem probíhá pomocí I2C sběrnice. Poslední 3 bity adresy lze volit pomocí třístavových vstupů ADR0 a ADR1.

Měření výstupního napětí zdroje probíhá na kanálu 1. Měřené napětí se snižuje pomocí děliče, který se skládá z rezistorů R43, R44 a R45. R44 je víceotáčkový trimr, kterým lze kompenzovat výrobní nepřesnost ostatních rezistorů v děliči. Mezi zemí a výstupem napěťového děliče je umístěna Zenerova dioda, jako ochrana proti přepětí na vstupu převodníku.

Měření výstupního proudu probíhá na kanálu 2. Měří se přímo napětí na výstupu IC11, které odpovídá protékajícímu proudu. Vstup převodníku je stejně jako u prvního kanálu chráněn proti přepětí Zenerovou diodou.

IC14 je teplotní čidlo s lineárním výstupem, které je určeno k umístění na chladič společně s výkonovými tranzistory. Při tříkrálovém měření A/D převodníkem lze výstup z čidla připojit pomocí jumperu SJ6 na vstup A/D převodníku, a měřit tak teplotu digitálně. V případě nevyužití této možnosti (například při analogovém ovládání zdroje), může toto čidlo sloužit jako teplotní ochrana zdroje. Výstup z čidla je připojen na dvojici komparátorů IC13A a IC13B v jednom pouzdře, které porovnávají napětí z čidla s referenčním napětím nastaveným trimry R53 a R55. Teplota, při které komparátor aktivuje optočlen, je nastavitelná přibližně od 0°C do 100°C. Tyto výstupy mohou být externě využity například pro spínání aktivního chlazení, nebo odpojení zátěže. Jumperem SJ13 lze Výstup z komparátoru IC13A připojit na vstup CLR D/A převodníku IC4. Při překročení nastavené teploty tedy dojde k vynulování jeho výstupů.

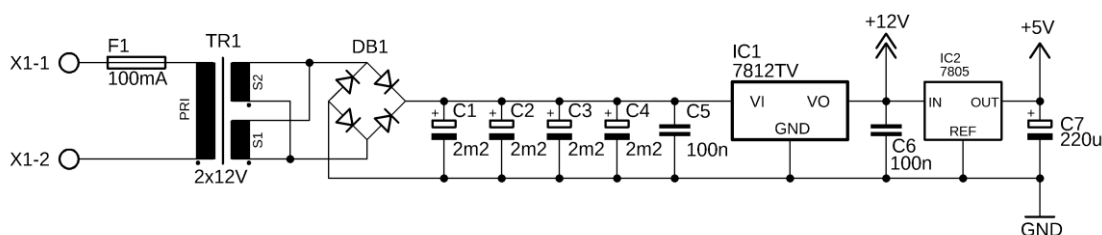
V případě nevyužití tříkrálového měření lze jako IC12 místo ADS1112IDGST od firmy Texas Instruments použít jako náhradu MCP3423 od firmy Microchip Technology. Tento A/D převodník disponuje pouze dvoukanálovým měřením s rozlišením až 18 bitů, je však cenově dostupnější.

2.2 Základová deska

Jako základová deska (též označována jako motherboard) je v té to práci označována deska, která slouží jako základna pro dvě desky zdrojů, zabezpečuje jim potřebné napájení, kombinuje jejich výstupy pomocí relé a zprostředkovává komunikaci s mikrokontrolérem. Schéma celé desky je uvedeno v příloze č. 2. Jednotlivé části jsou dále podrobněji rozebrány.

2.2.1 Vlastní napájení

Tato část zapojení zajišťuje napětí 12 V pro napájení relé a ventilátorů a napětí 5 V pro napájení logiky. Schéma je uvedeno na obrázku 2.6.

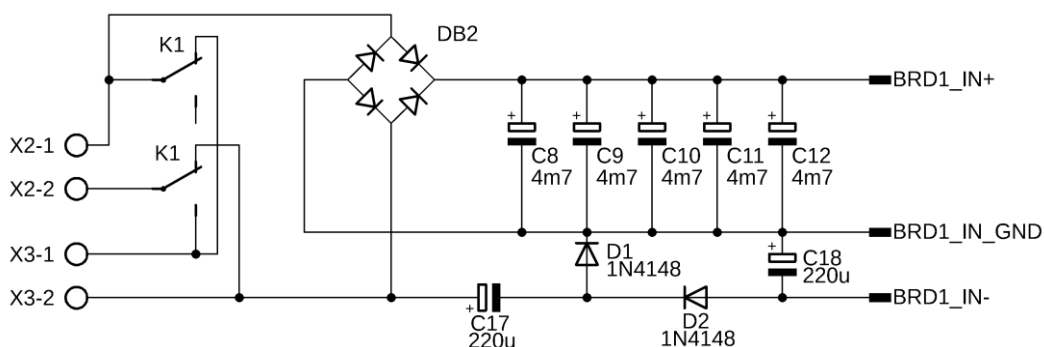


Obrázek 2.6 Schéma napájecí části motherboardu

Síťové napětí 230 V~ je sníženo na 12V~ pomocí transformátoru. Toto napětí je usměrněno Graetzovým můstkem a filtrováno pomocí kondenzátorů C1 – C5. Větší počet filtračních kondenzátorů s menší kapacitou byl zvolen kvůli možnosti lepšího rozmístění na desce plošných spojů. Napětí je dále sníženo na 12 V pomocí lineárního integrovaného stabilizátoru 7812, a dále sníženo na 5 V pomocí stabilizátoru 7805. Kondenzátory C6 a C7 zabraňují rozkmitání stabilizátorů.

2.2.2 Napájení zdrojů

Schéma napájení zdrojů je uvedeno na obrázku 2.7.



Obrázek 2.7 Schéma napájení zdrojů

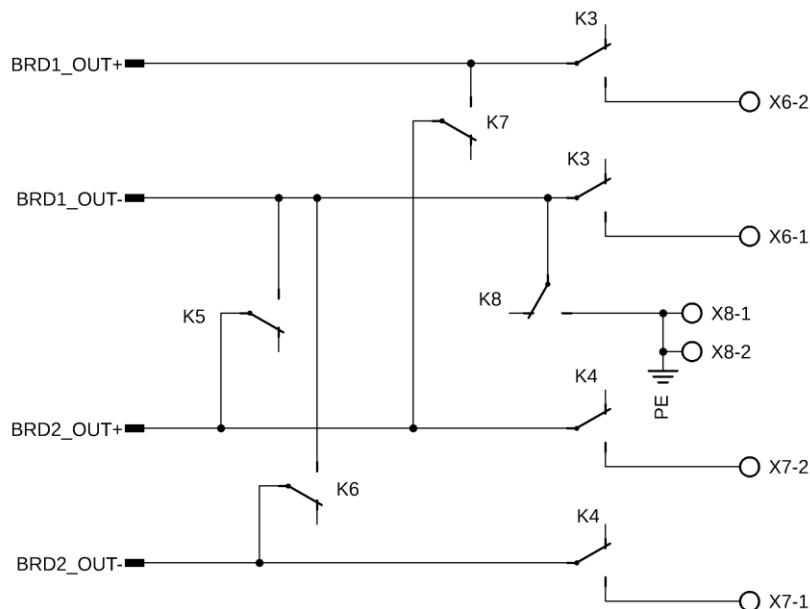
Napájení desky zdroje zajišťuje toroidní transformátor se dvěma sekundárními vinutími o jmenovitém napětí 25 V~. Vinutí jsou připojena na svorky X2 a X3. Pomocí relé K1 lze přepínat mezi sériovým a paralelním spojením těchto vinutí. Při polovičním výstupním napětí tak lze odebírat dvojnásobný proud. Napětí spojených sekundárních vinutí je usměrněno pomocí můstkového usměrňovače a filtrováno pomocí kondenzátorů C8 – C12.

Záporné napájecí napětí, které deska zdroje potřebuje pro svou správnou činnost, je získáváno pomocí násobiče napětí, který se skládá z kondenzátorů C17 a C18, a diod D1 a D2. Násobič poskytuje záporné napětí o stejné velikosti, jako kladné napájecí napětí. Odběr je však minimální, a navíc je toto napětí v desce zdroje sníženo na -12 V. Je tedy přijatelné velké výstupní zvlnění, a není třeba použít kondenzátory s velkou kapacitou.

Zapojení napájení je pro oba zdroje totožné.

2.2.3 Kombinace výstupů zdrojů

Pro snadnější práci s laboratorním zdrojem, a zejména minimalizaci nutnosti externího propojování jeho výstupů, byl na základovou desku implementován mechanismus propojování výstupů pomocí relé. Jeho schéma je uvedeno na obrázku 2.8.



Obrázek 2.8 Schéma kombinování výstupů zdrojů

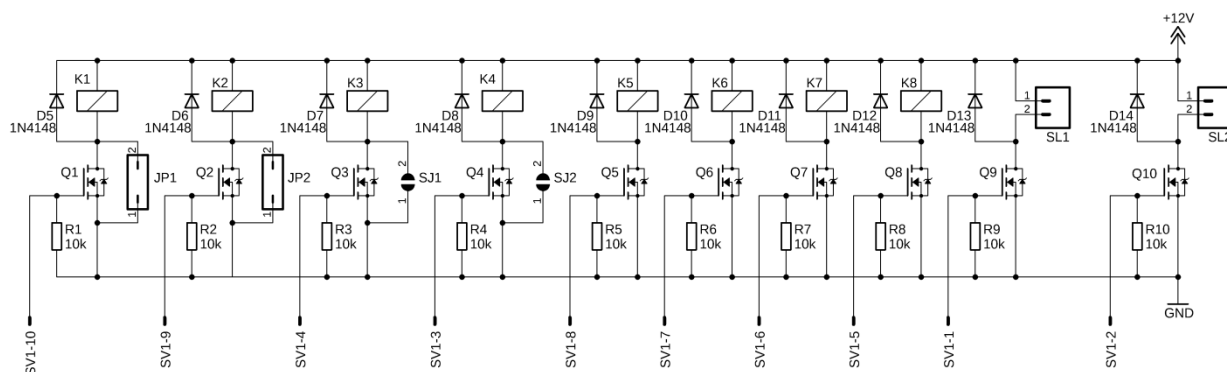
Základem pro bezpečné oživování a testování elektronických zařízení v laboratorních podmínkách je možnost fyzického odpojení napájení. To lze provést pro každý výstup zvlášť pomocí relé K3 pro zdroj č. 1 a relé K4 pro zdroj č. 2. Sériové spojení zdrojů umožňuje relé K5, které spojuje záporný pól zdroje č. 1 s kladným pólem zdroje č. 2.

Paralelní kombinaci obou zdrojů umožňují relé K6 a K7, přičemž obě relé lze spínat zvlášť. Sepnutím relé K6 se spojí záporné póly obou zdrojů. Toho lze využít například pokud je potřeba napájení o dvou různých napětích se společným potenciálem. Při sepnutí relé K7 jsou propojeny i kladné póly obou zdrojů. V případě paralelního kombinování zdrojů je třeba softwarově zajistit, aby oba zdroje měly stejné výstupní napětí.

Relé K8 umožňuje připojit záporný pól zdroje č. 1 k uzemnění. V případě sériového spojení obou zdrojů je tak uzemněn jejich střed.

2.2.4 Ovládání relé a ventilátorů

Relé i ventilátory jsou ovládány pomocí logických úrovní přiváděných do základové desky přímo z mikrokontroléru. Schéma je uvedeno na obrázku 2.9.

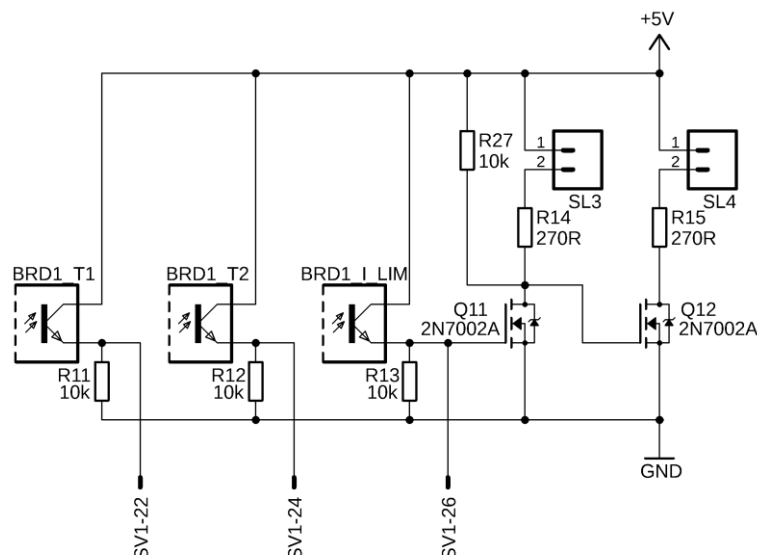


Obrázek 2.9 Ovládání relé a ventilátorů

Spínání relé i ventilátorů je zajištěno pomocí unipolárních tranzistorů typu N-MOSFET, které se vyznačují nízkým odporem v sepnutém stavu. Protože cívka relé i vinutí motoru ventilátoru je indukční zátěž, je kvůli ochraně spínacích prvků nutné použít antiparalelně zapojenou diodu, která zabrání vzniku napětových špiček při rychlém odpojení indukční zátěže. Relé K1 a K2, které přepínají mezi paralelní a sériovou kombinací sekundárních vinutí transformátorů pro zdroje, lze sepnout také propojením jumperů JP1 a JP2. To může být užitečné zejména při oživování, provádění oprav, měření, či jiných servisních pracích na zdroji. Ze stejných důvodů lze propojením jumperů SJ1 a SJ2 trvale sepnout relé K3 a K4, která připojují výstupy zdrojů k výstupním svorkám pro připojení zátěže. Svorky SL1 a SL2 slouží k připojení ventilátorů. Rychlost jejich otáček lze řídit PWM modulací.

2.2.5 Zpracování vstupních a výstupních signálů zdrojů

Ovládání zdrojů i jejich výstupní signály jsou galvanicky odděleny pomocí optočlenů. Schéma zpracování výstupů ze zdrojů je uvedeno na obrázku 2.10.



Obrázek 2.10 Schéma zpracování výstupních signálů ze zdrojů

Pokud jsou optočleny neaktivní, je výstup díky pull down rezistoru ve stavu logické nuly. Pokud se tranzistor v optočlenu sepne, začne rezistorem protékat proud a vzroste na něm napětí do stavu logické jedničky.

Na výstup signalizace stavu proudové limitace jsou přímo připojeny LED diody, signalizující činnost zdroje v režimu konstantního proudu, nebo konstantního napětí. Pokud je zdroj ve stavu proudové limitace, je optočlen aktivní. Tím vzroste napětí na gate tranzistoru Q11 a LED diodou připojenou na svorku SL3 začne protékat proud. Zároveň klesne napětí na gate tranzistoru Q12 a LED diodou připojenou na svorku Q12 proud neprotéká. LED dioda na SL3 tedy signalizuje činnost zdroje v režimu konstantního proudu (proudová limitace) a LED dioda připojená na SL3 signalizuje činnost zdroje v režimu konstantního napětí. Toto zapojení je totožné pro oba zdroje.

Aktivace optočlenů pro vstupní signály do zdrojů probíhá přivedením logické jedničky na anodu LED diody v optočlenu.

2.3 Digitální řízení a ovládání

Pro účely digitálního řízení laboratorního zdroje byl s ohledem na cenu a praktičnost zvolen mikrokontrolér ATmega2560 na platformě Arduino Mega. Platforma Arduino Mega disponuje vlastním stabilizátorem napájecího napětí, a umožňuje programování mikrokontroléru pomocí USB. Pro připojení periférií k mikrokontroléru byl vytvořen tzv. „shield“, tedy deska, která je navržena tak, že svým rozmístěním kontaktů odpovídá kontaktům arduina, a lze ji do něj přímo připojit. Na této desce se nachází konektor pro připojení základové desky, a konektory pro připojení ovládacích a zobrazovacích prvků, které budou dále popsány.

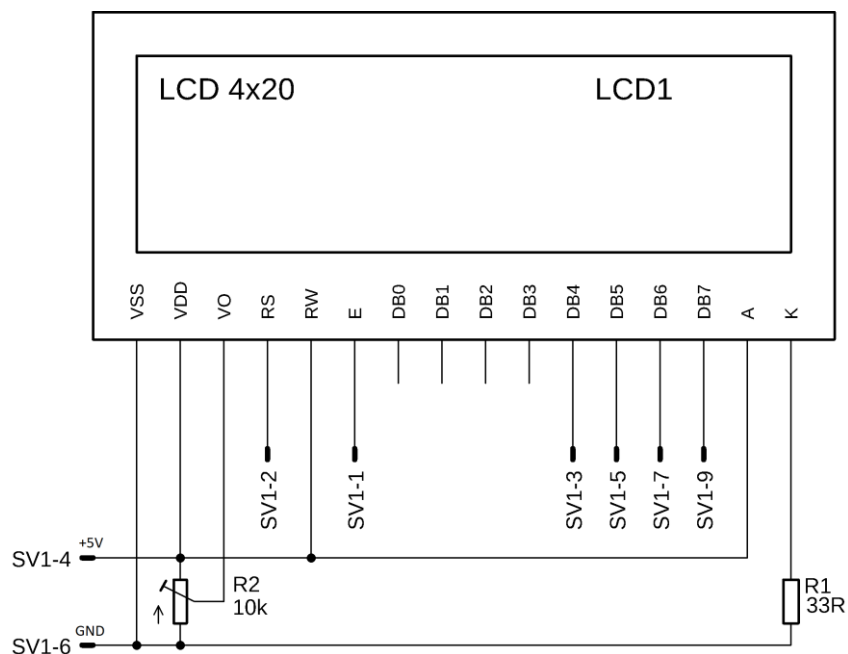
2.3.1 Display

Pro účely zobrazování nastavených a měřených veličin, případně informací o stavu zdroje, byl zvolen alfanumerický LCD display RC2004A-BIW-ESX. Disponuje integrovaným LED podsvícením, a dokáže zobrazit 4 řádky o délce 20 znaků. Display je řízen řadičem ST7066, jehož ovládání je kompatibilní se starším řadičem LCD displayů HD44780. Uspořádání vývodů display a jejich funkce je uvedena v tabulce 2.

Tabulka 2 Popis vývodů LCD displaye

Číslo vývodu	Signál	Funkce
1	Vss	GND
2	Vdd	Napájecí napětí (typ. 5 V)
3	Vo	Nastavení kontrastu
4	RS	Data (log. 1) / Příkazy (log. 0)
5	R/W	Zápis (log. 1) / Čtení (log. 0)
6	E	Povolení (enable)
7	DB0	data / příkaz
8	DB1	data / příkaz
9	DB2	data / příkaz
10	DB3	data / příkaz
11	DB4	data / příkaz
12	DB5	data / příkaz
13	DB6	data / příkaz
14	DB7	data / příkaz
15	A	Anoda LED podsvětlení
16	K	katoda LED podsvětlení

Pro účely připojení displaye ke konektoru a obsluhy jeho analogových funkcí byla navržena jednoduchá deska, jejíž schéma zapojení je na obrázku 2.11.

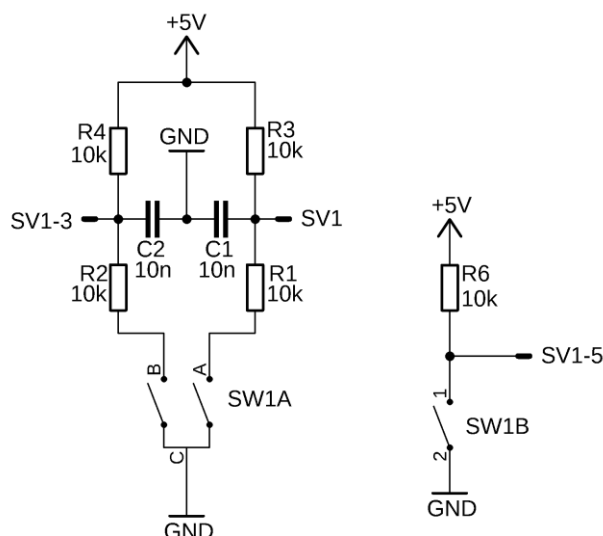


Obrázek 2.11 Schéma zapojení LCD displaye

Kontrast displaye je podle doporučení výrobce řízen pomocí trimru R2. Rezistor R1 určuje proud LED poosvětlení. Data se do displaye nahrávají pouze pomocí horních 4 bitů, aby se omezil počet pinů mikrokontroléru, které je nutné využít. Displaye jsou použity celkem dva, každý pro samostatné zobrazení dat příslušného zdroje. Všechny vývody kromě signálu Enable jsou pro oba displaye společné. Signálem Enable se určuje, pro který display jsou aktuální data určena.

2.3.2 Enkodéry

Pro ovládání výstupního napětí a proudu zdrojů jsou určeny inkrementační enkodéry. Pro připojení enkodéru k mikrokontroléru byla navržena deska, na které jsou umístěny dva enkodéry a obvody pro jejich obsluhu. Celé schéma desky je uvedeno v příloze číslo 3. Na obrázku 2.12 je uvedeno schéma zapojení jednoho enkodéru.



Obrázek 2.12 Schéma zapojení enkodéru

Rezistory R1 – R4 spolu s kondenzátory C1 a C2 slouží k filtraci zákmitů kontaktů enkodéru. Zapojení vychází z doporučení výrobce. SW1B je tlačítko, které se aktivuje při zmáčknutí osy enkodéru. Toho lze využít například při volbě kroku nastavení příslušné veličiny. Při nesepnutém tlačítku se veličina nastavuje s velkým krokem, při sepnutém tlačítku se pak veličina mění s menším krokem.

2.3.3 Ovládací tlačítka

Pro volbu kombinací obou zdrojů slouží celkem 7 tlačítek. Každé tlačítko má integrované podsvětlení LED diodou, které signalizuje aktivaci příslušné funkce. Tlačítka jsou umístěna na samostatné desce, která však má montážní otvory společné s dvěma LCD displayi po stranách. Tím se snižuje počet nutných montážních otvorů v předním panelu. Deska tlačítek se k mikrokontroléru připojuje dvěma konektory, zvlášť pro tlačítka a zvlášť pro jejich podsvětlení. Funkce jednotlivých tlačítek jsou uvedeny v tabulce číslo 3.

Tabulka 3 Přehled funkcí tlačítek

Tlačítko	Funkce
T1	Nastavení stejných parametrů pro oba zdroje
T2	Spojení kladných pólů zdrojů
T3	Připojení svorek ke zdroji 1
T4	Sériové spojení zdrojů
T5	Spojení záporných pólů zdrojů
T6	Připojení svorek ke zdroji 2
T7	Připojení uzemnění ke zdroji 1

Rozmístění tlačítek na panelu je patrné z osazovacího plánu v příloze 3.

3 MĚŘENÍ

3.1 Vnitřní odpor

Model reálného zdroje napětí je tvořen ideálním zdrojem napětí, a sériovým odporem, neboli vnitřním odporem zdroje. Velikost tohoto odporu určuje, jak se změní napětí na výstupu zdroje při změně velikosti odebíraného proudu.

Při odpojené zátěži bylo naměřeno výstupní napětí zdroje $U_{out} = 50,11$ V. Při připojení zátěže bylo naměřeno výstupní napětí $U_{out} = 49,98$ V a výstupní proud $I_{out} = 3,009$ A. Vnitřní odpor zdroje spočítáme jako

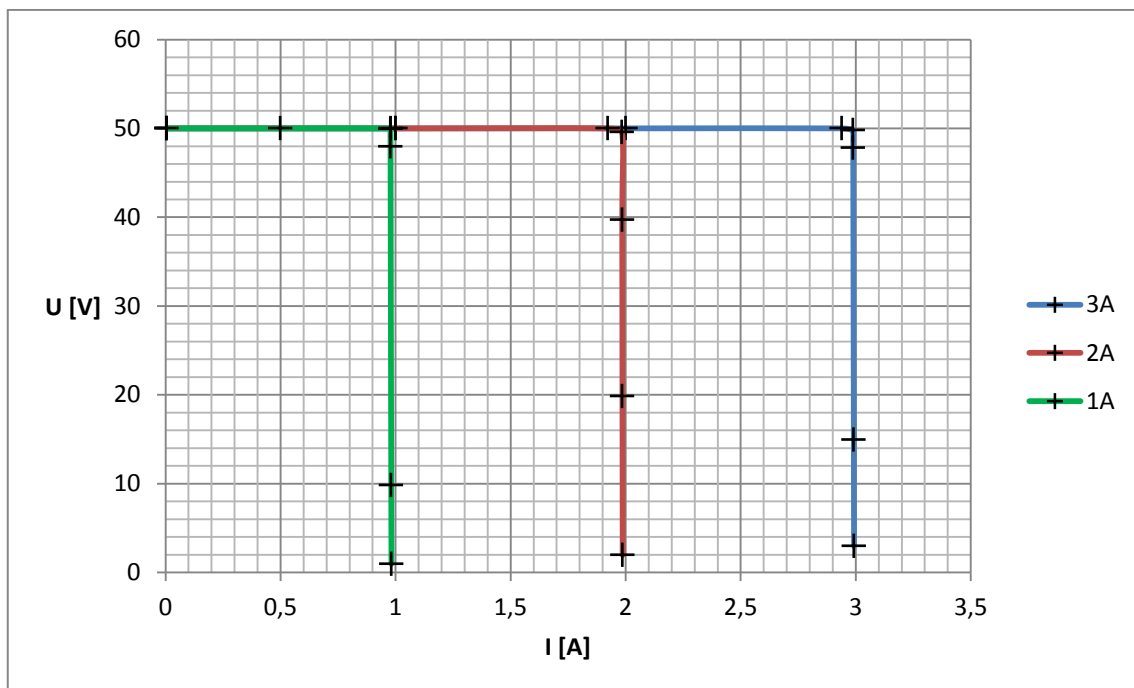
$$R = \frac{U_{out0} - U_{out}}{I_{out}} = \frac{50,11 - 49,98}{3,009} = 0,043 \Omega$$

Při počítačové simulaci zapojení zdroje nebyla zaznamenána změna výstupního napětí bez zátěže a při zátěži. Teoretický vnitřní odpor zapojení je tedy nulový. Nenulový vnitřní odpor reálného zapojení je způsobený odpory vodičů vedoucích od zdroje k zátěži a přechodovými odpory použitých spojů.

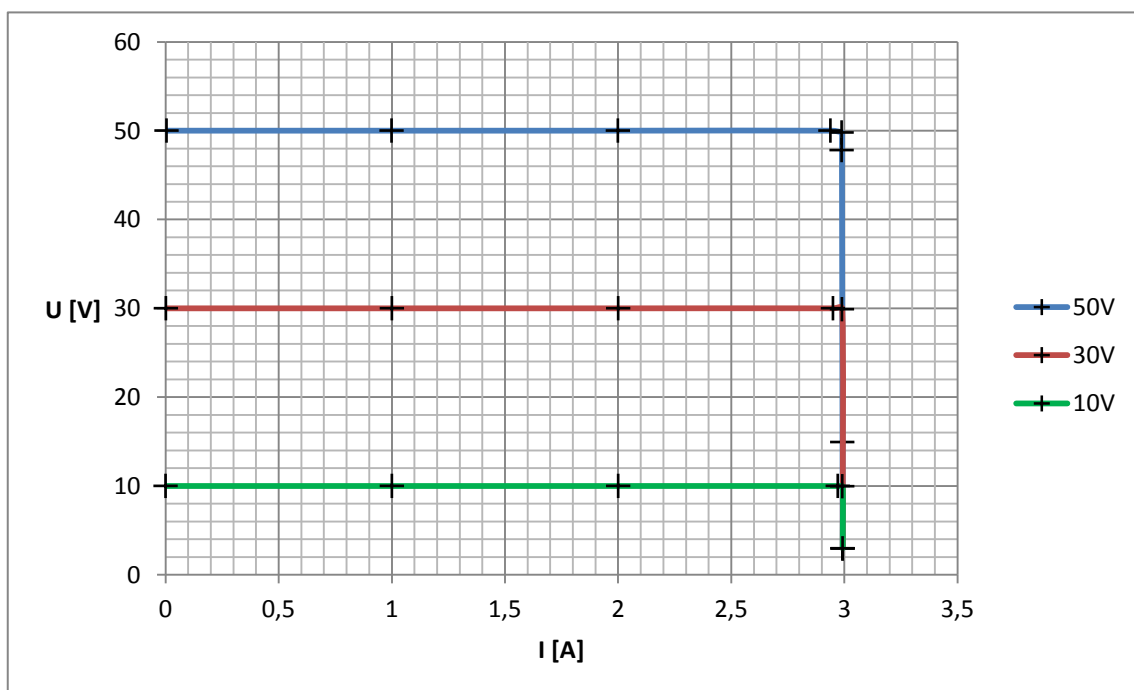
3.2 Zatěžovací charakteristika

Zatěžovací charakteristika zdroje udává závislost výstupního napětí na výstupním proudu. Nastavení výstupního napětí ani proudové limitace se během měření nemění, výstupní proud se nastavuje pomocí proměnlivé zátěže. Pokud je výstupní proud menší, než maximální nastavený proud, chová se zdroj jako zdroj konstantního napětí. Přesáhne-li tuto hodnotu, chová se zdroj jako zdroj proudu.

Na obrázku 3.1 jsou vyneseny simulované zatěžovací charakteristiky pro několik různých nastavení proudové limitace při stejném nastavení výstupního napětí. V obrázku 3.2 jsou vyneseny simulované zatěžovací charakteristiky pro několik různých nastavení výstupního napětí

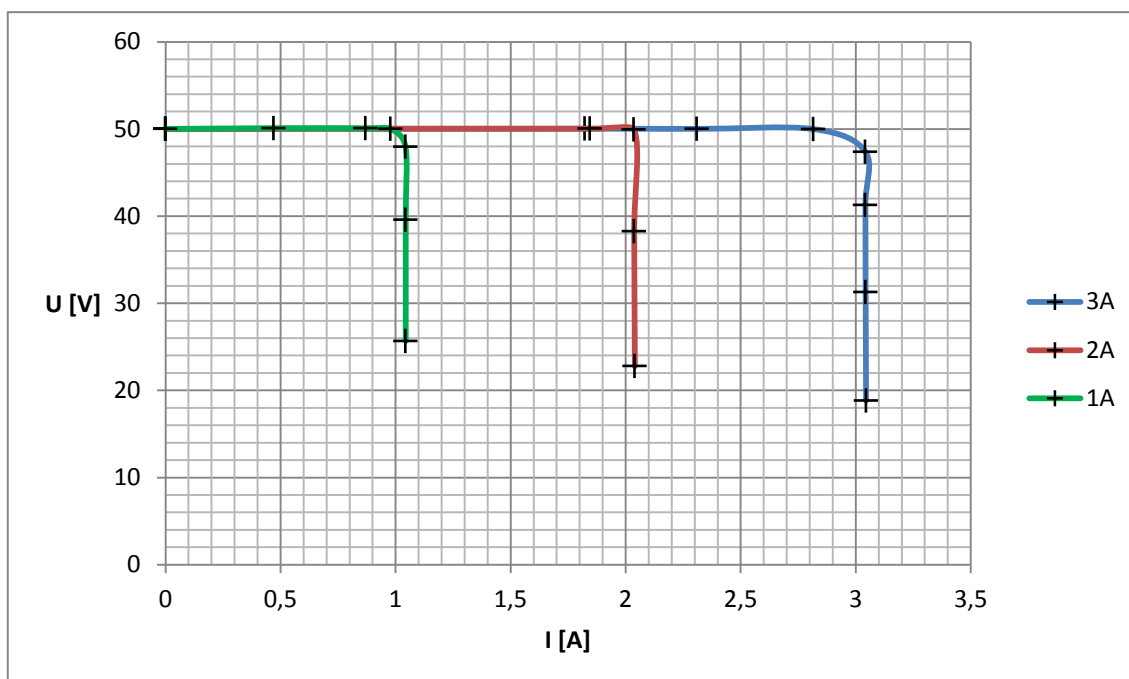


3.1 Počítačová simulace zatěžovací charakteristik zdroje při změnách proudové limitace

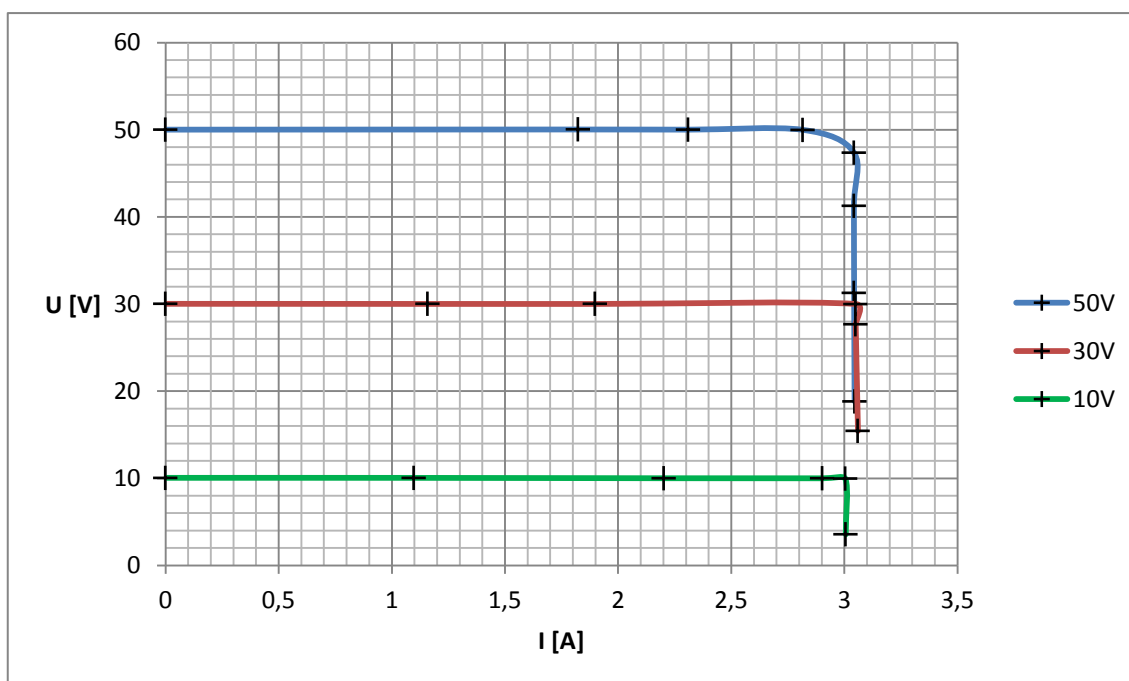


3.2 Počítačová simulace zatěžovacích charakteristik zdroje při změnách nastavení napětí

Na obrázku 3.3 jsou vyneseny měřené zatěžovací charakteristiky pro několik různých nastavení proudové limitace při stejném nastavení výstupního napětí. V obrázku 3.4 jsou vyneseny simulované zatěžovací charakteristiky pro několik různých nastavení výstupního napětí



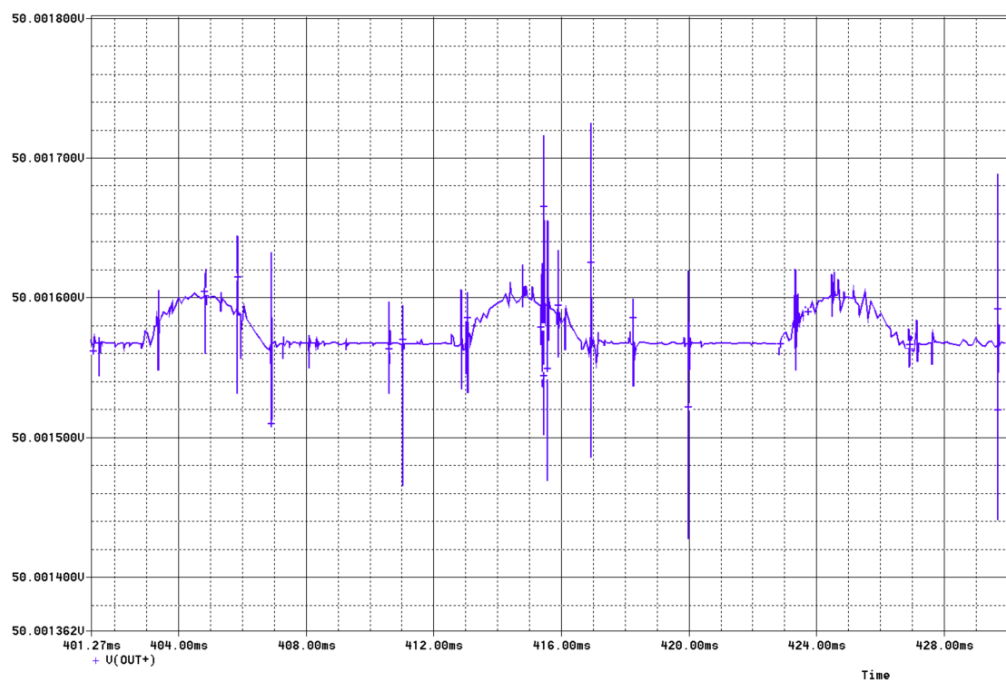
3.3 Měření zatěžovací charakteristiky zdroje při změnách proudové limitace



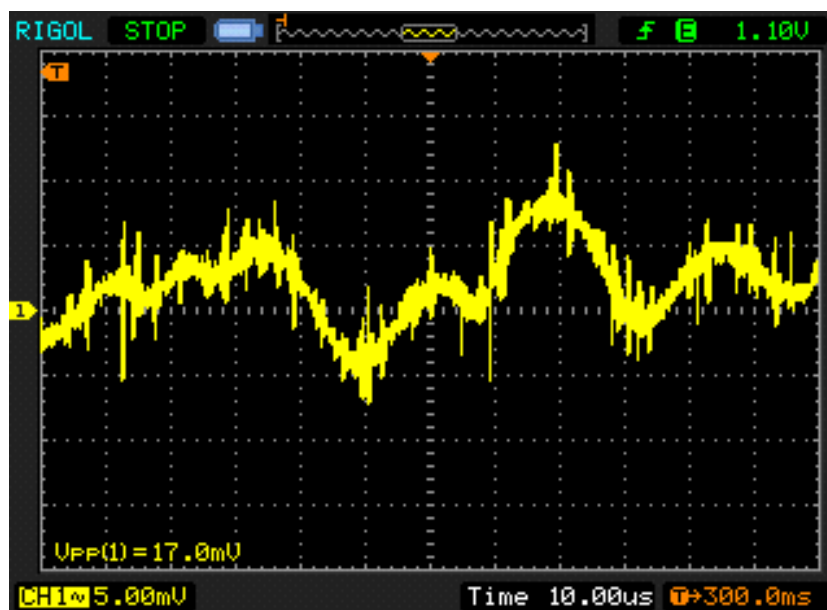
3.4 Počítačová simulace zatěžovacích charakteristik zdroje při změnách nastavení napětí

3.3 Výstupní zvlnění

Na obrázku 3.5 je průběh počítačové simulace zvlnění výstupního napětí zdroje při nastaveném napětí 50 V a odběru 3 A. Rozdíl mezi maximálním a minimálním napětím je 328 μV . Na obrázku 3.5 je změřený průběh zvlněného napětí na výstupu zdroje. Zvlnění je přibližně 17 mV. Rozdíl oproti simulaci je způsoben použitím reálných součástek s výrobní tolerancí parametrů a okolními rušivými vlivy.



3.5 Počítačová simulace výstupního zvlnění



3.6 Měření výstupního zvlnění

ZÁVĚR

V bakalářské práci byly prostudovány jednotlivé způsoby řešení napájecích zdrojů. Na základě toho bylo vybráno vhodně řešení laboratorního zdroje. Byl navržen a zkonstruován univerzální modul laboratorního zdroje s možností digitálního řízení i měření přes I2C sběrnici. Zapojení bylo navrhováno s důrazem na univerzálnost a možnost použití v množství různých aplikacích. Zdroj dosahuje výstupního napětí až 50 V při proudu 3 A, nebo 20 V při proudu 6 A. Lze tedy dosáhnout vyššího napětí, než bylo zadáno.

Dále bylo navrženo a zkonstruováno zapojení pro napájení a obsluhu dvou modulů laboratorních zdrojů, které mohou pracovat samostatně, nebo součinně. Je možné volit sériové spojení zdrojů, spojení záporných svorek či kladných svorek nebo připojení zemního vodiče. Dále je možné oba výstupy zdrojů odpojit od výstupních svorek přístroje. Díky těmto možnostem je práce se zdrojem v laboratoři snadnější.

Bylo navrženo a zkonstruováno digitální řízení celého laboratorního zdroje pomocí mikrokontroléru ATmega2560 na platformě Arduino.

Měřením byla ověřena funkčnost zdroje v celém rozsahu výstupních parametrů. Při oživování a měření se objevily problémy s odvodem tepla z některých součástek, které je nutné dále řešit.

LITERATURA

- [1] ATMEI, *ATmega2560*. Datasheet. Dostupné na http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/Atmel-2549-8-bit-AVR-Microcontroller-ATmega640-1280-1281-2560-2561_Summary.pdf
- [2] BARTUŠEK, K., GESCHEIDITOVÁ, E., REZ, J., STEINBAUER, M., KUBÁSEK, R., MIKULKA, J. Měření v elektrotechnice. 2., přeprac. a dopl. vydání. Vysoké učení technické, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav teoretické a experimentální techniky, Brno, 2010, 212 s. ISBN 978-80-214-4160-6
- [3] JEZIERSKI, Eugeniusz. Transformátory: teoretické základy. Praha: Academia, 1973.
- [4] KREJČÍŘÍK, Alexandr. Lineární napájecí zdroje. Praha: BEN - technická literatura, 2001. ISBN 80-7300-002-4.
- [5] KREJČÍŘÍK, Alexandr. DC/DC měniče. Praha: BEN, 2001. ISBN 80-7300-045-8.
- [6] KOTOL, Martin. Dvojitý digitálně řízený napájecí zdroj. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Ústav radioelektroniky, 2012. Bakalářská práce. Vedoucí práce: ing. Roman Šotner, Ph.D.
- [7] MOŠTĚK, Jiří. Návrh dvojitého stabilizovaného napájecího zdroje. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Ústav radioelektroniky, 2012. Bakalářská práce. Vedoucí práce: prof. ing. Lubomír Brančík, Ph.D.
- [8] NOVOTNÝ, Vlastislav, Pavel VOREL a Miroslav PATOČKA. Napájení elektronických zařízení: přednášky. Brno: Vysoké učení technické, 2002. ISBN 80-214-2300-5

Seznam symbolů a zkratk

Zkratky:

A/D	...	Analog to digital
ADC	...	Analog to Digital Converter
D/A	...	Digital to analog
DAC	...	Digital to Analog Converter
PWM	...	Pulse Width Modulation
OZ	...	Operační zesilovač

Symboly:

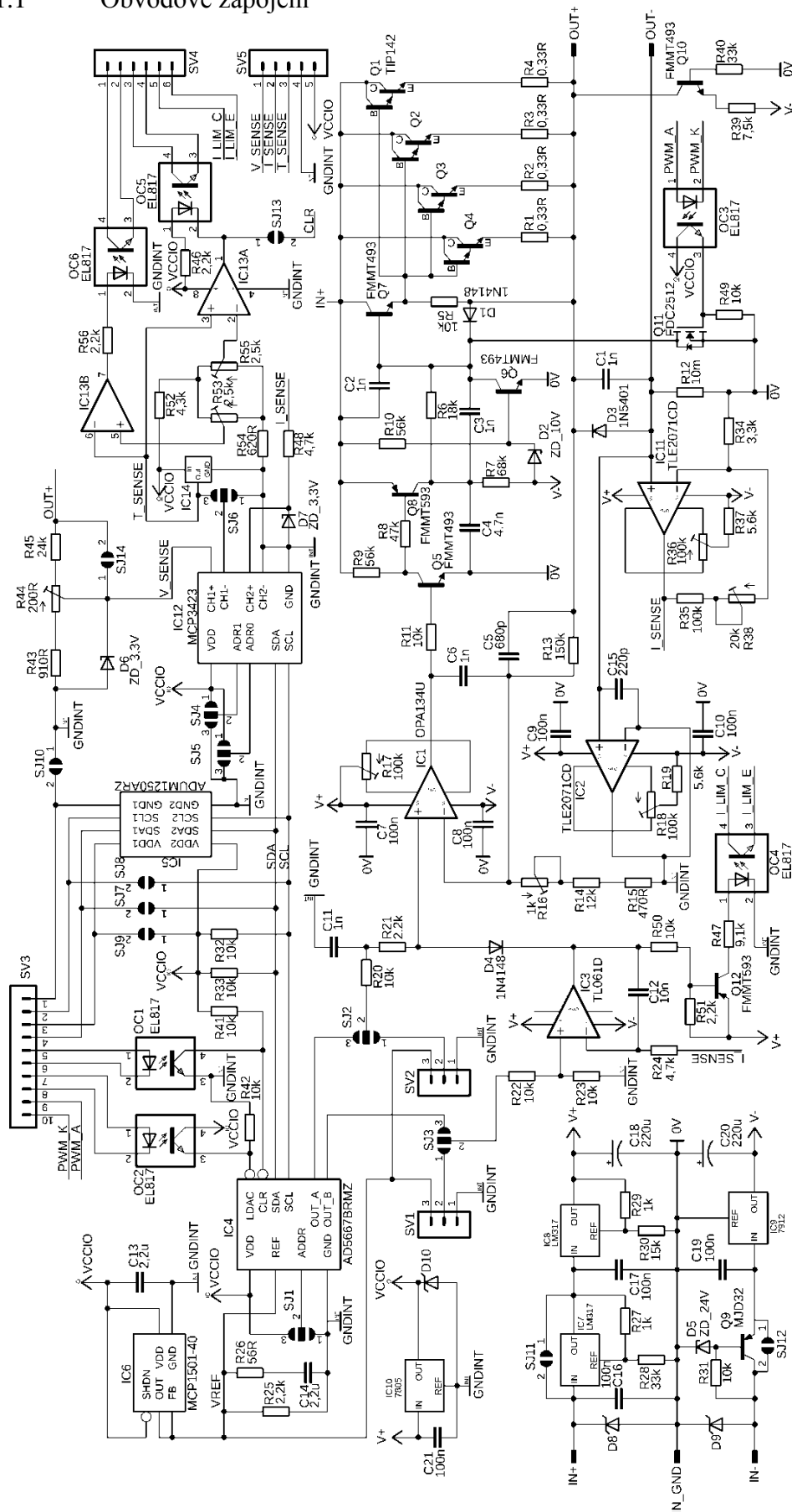
Φ	...	Magnetický tok	[Wb]
P	...	Výkon	[W]
U	...	Napětí	[V]
I	...	Proud	[A]
N	...	Počet závitů	[-]
p	...	Zvlnění	[%]
C	...	Kapacita	[F]
R	...	Odpor	[Ω]

Seznam příloh

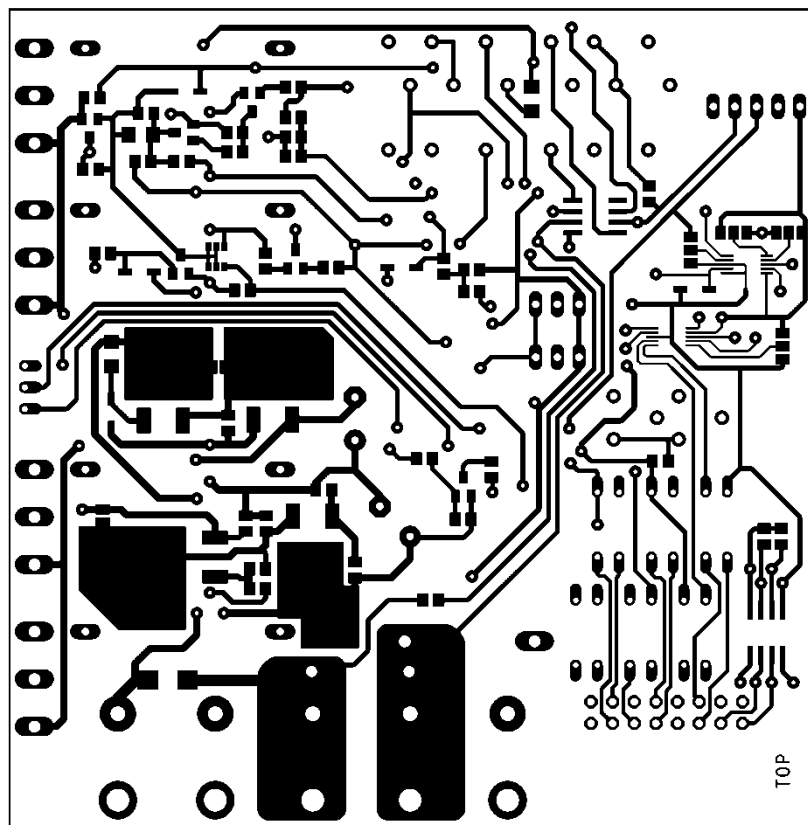
Příloha 1 - Dokumentace desky zdroje	42
Příloha 2 - Dokumentace základové desky	47
Příloha 3 - Dokumentace digitální části	54
Příloha 4 - Fotodokumentace	64

Příloha 1 - Dokumentace desky zdroje

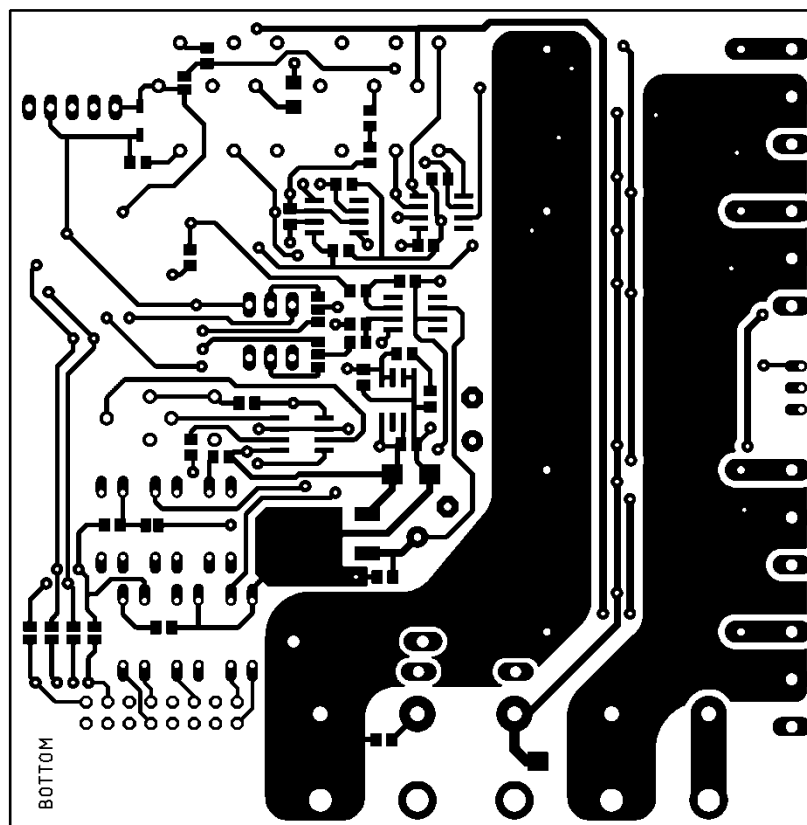
1.1 Obvodové zapojení



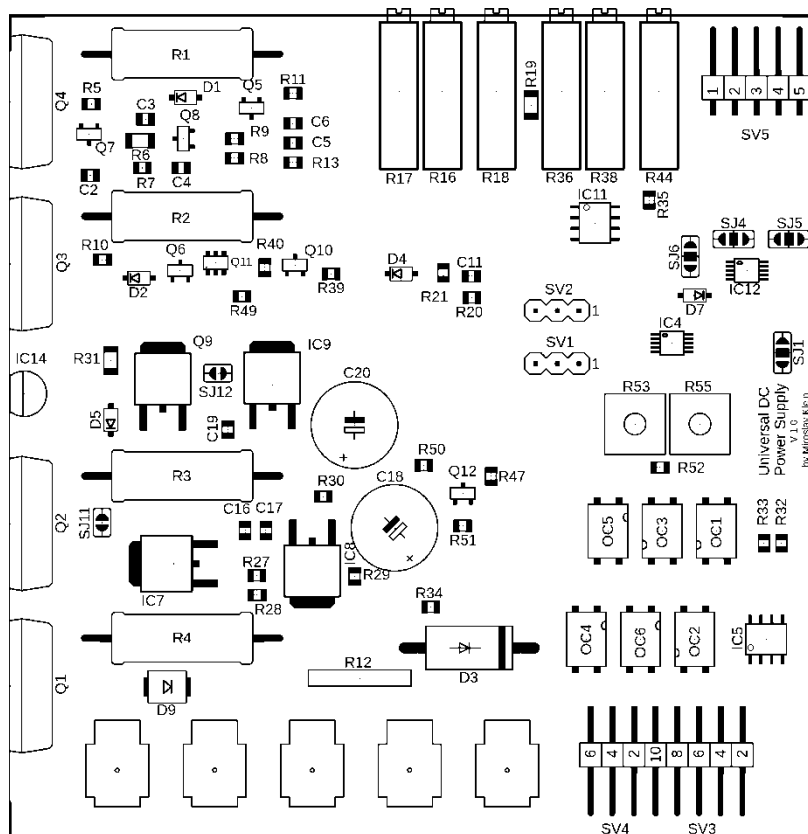
1.2 Deska plošného spoje – TOP (strana součástek) – rozměry 95 x 97mm



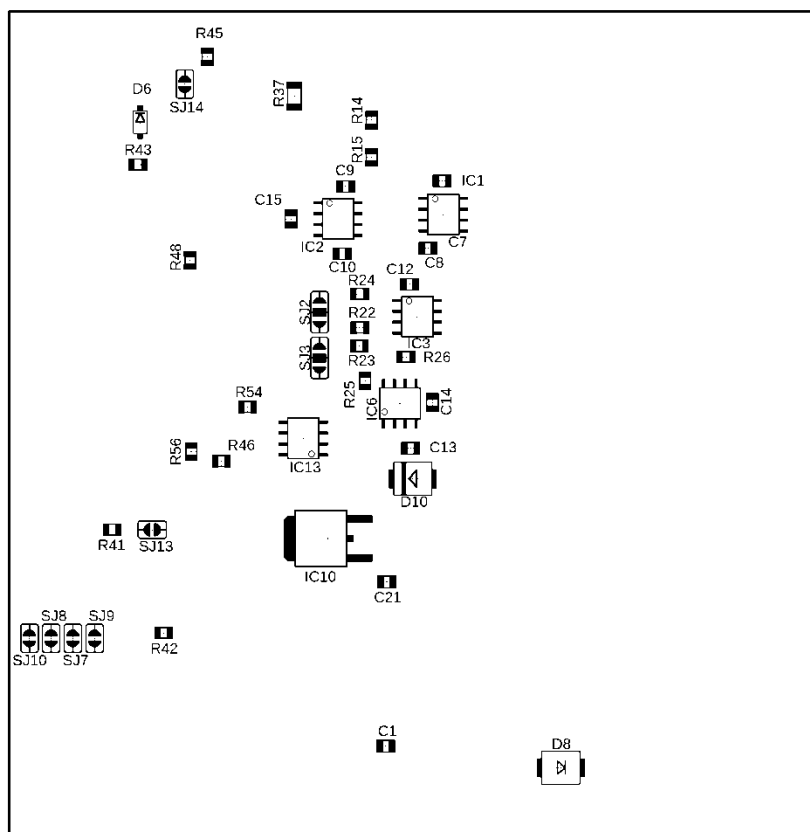
1.3 Deska plošného spoje – BOTTOM (strana spojů)



1.4 Osazovací plán – TOP



1.5 Osazovací plán – BOTTOM



1.6 Seznam součástek

Označení	Hodnota / Typ
C1	1n
C2	1n
C3	1n
C4	4,7n
C5	680p
C6	1n
C7	100n
C8	100n
C9	100n
C10	100n
C11	1n
C12	12n
C13	2,2u
C14	2,2u
C15	220p
C16	100n
C17	100n
C18	220u
C19	100n
C20	220u
C21	100n
D1	1N4148W-7-F
D2	BZV55C10SMD
D3	1N5401
D4	1N4148W-7-F
D5	BZV55C24SMD
D6	BZV55C3.3SMD
D7	BZV55C3.3SMD
D8	SMBJ75D-M3/H
D9	SMBJ75D-M3/H
D10	SMT6T6V8A
IC1	OPA134UA
IC2	TLE2071CD
IC3	TL061D
IC4	AD5667BRMZ
IC5	ADUM1250ARZ
IC6	MCP1501-40E/SN
IC7	LM317DMTG
IC8	LM317DMTG
IC9	MC7912BD2TG

Označení	Hodnota / Typ
IC10	MC7805CDTG
IC11	TLE2071CD
IC12	ADS1112IDGST
IC13	TS3702CD
IC14	MCP9700-E/TO
OC1	EL817
OC2	EL817
OC3	EL817
OC4	EL817
OC5	EL817
OC6	EL817
Q1	TIP142
Q2	TIP142
Q3	TIP142
Q4	TIP142
Q5	FMMT493TA
Q6	FMMT493TA
Q7	FMMT493TA
Q8	FMMT593TA
Q9	MJD32CT4
Q10	FMMT493TA
Q11	FDC5212
Q12	FMMT593TA
R1	0,33R / 3W
R2	0,33R / 3W
R3	0,33R / 3W
R4	0,33R / 3W
R5	10k
R6	18k
R7	68k
R8	47k
R9	56k
R10	56k
R11	10k
R12	0,01R
R13	150k
R14	12k
R15	470R
R16	T196P-1k
R17	T196P-100k

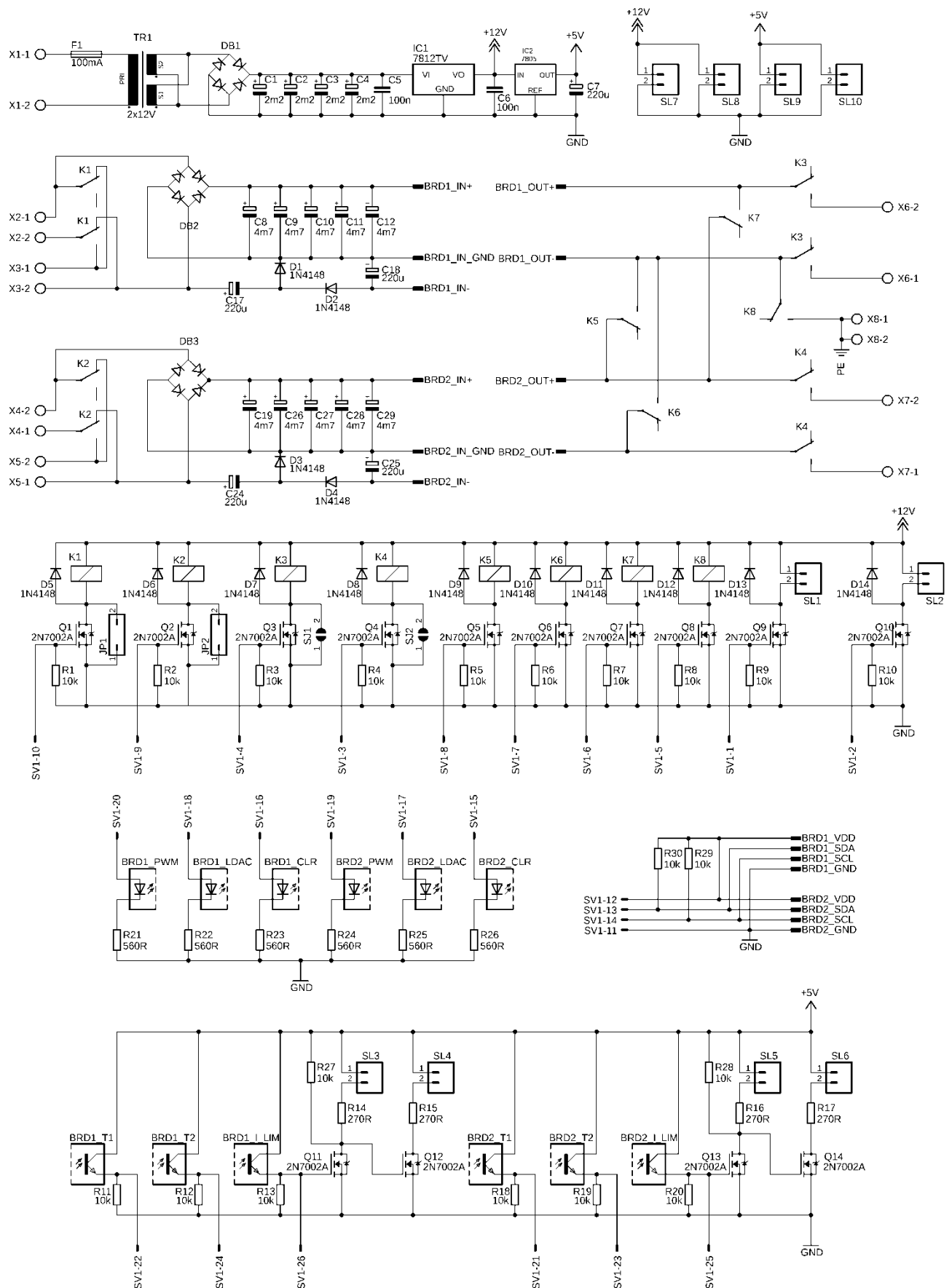
Označení	Hodnota / Typ
R18	T196P-100k
R19	5,6k
R20	10k
R21	2,2k
R22	10k
R23	10k
R24	4,7k
R25	2,2k
R26	56R
R27	1k
R28	33k
R29	1k
R30	15k
R31	10k
R32	10k
R33	10k
R34	3,3k
R35	100k
R36	T196P-100k
R37	5,6k
R38	T196P-20k
R39	7,5k
R40	33k
R41	10k
R42	10k
R43	910R
R44	T196P-200R
R45	24k
R46	2,2k
R47	9,1k
R48	4,7k
R49	10k
R50	10k
R51	2,2k
R52	4,3k
R53	CA6V 2k5
R54	620R
R55	CA6V 2k5
R56	2,2k

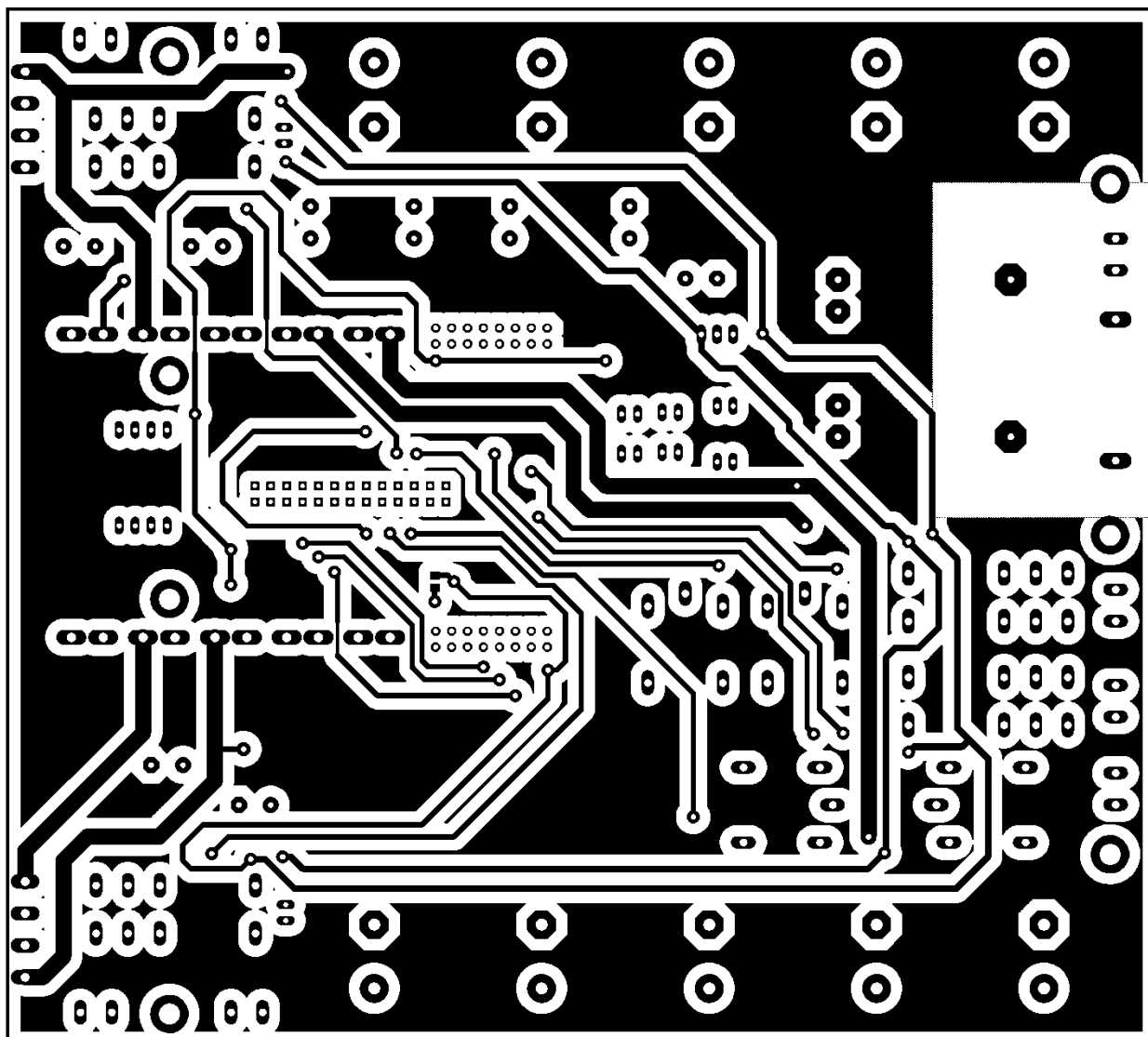
1.7 Popis konektorů

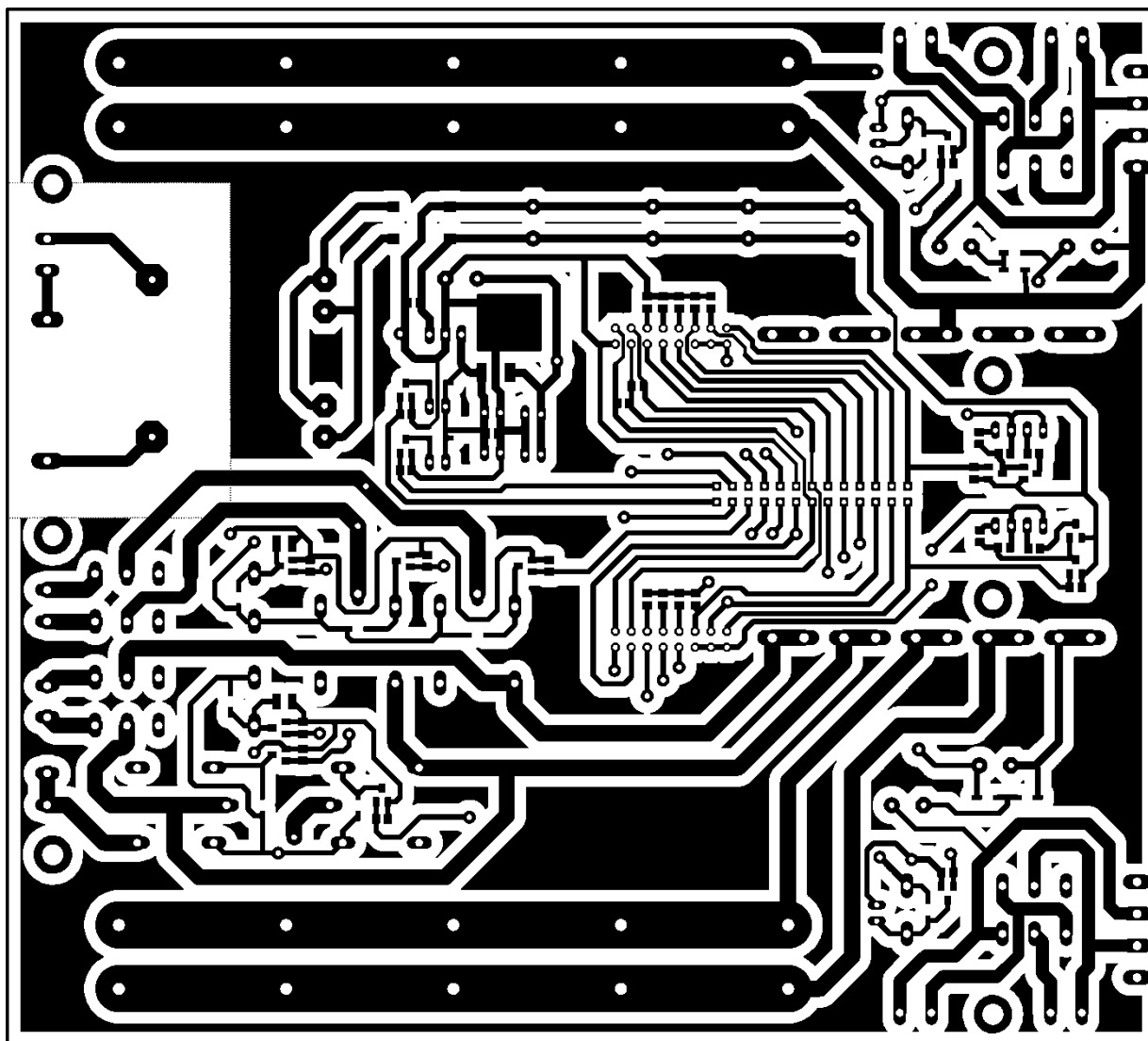
Konektor	Funkce	Pin	Signál
SV1	Potenciometr proud	1	GND
		2	jezdec
		3	reference
SV2	Potenciometr napětí	1	GND
		2	jezdec
		3	reference
SV3	I2C sběrnice	1	GND
		2	SCL
		3	5V
		4	SDA
	LDAC D/A převodníku (optočlen)	5	Anoda
		6	Katoda
	CLR D/A převodníku (optočlen)	7	Anoda
		8	Katoda
	PWM modulace výstupního napětí (optočlen)	9	Anoda
		10	Katoda
SV4	Překročení teploty T1 (optočlen)	1	Kolektor
		2	Emitor
	Překročení teploty T2 (optočlen)	3	Kolektor
		4	Emitor
	Signalizace proudové limitace (optočlen)	5	Kolektor
		6	Emitor
SV5	Analogové výstupy pro externí měření	1	Měření napětí
		2	Měření proudu
		3	Měření teploty
		4	GND
		5	napájení 5V

Příloha 2 - Dokumentace základové desky

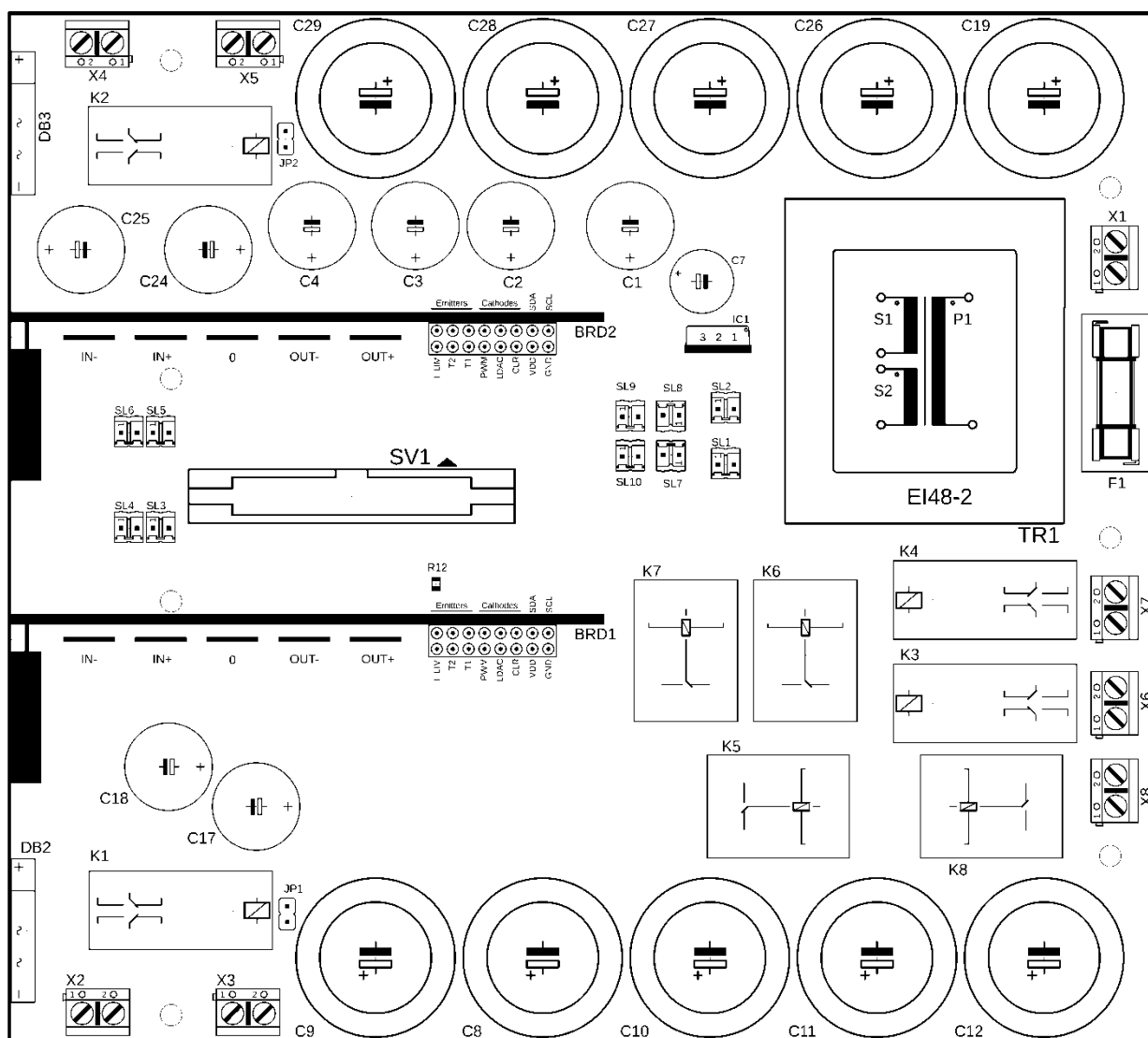
2.1 Obvodové zapojení



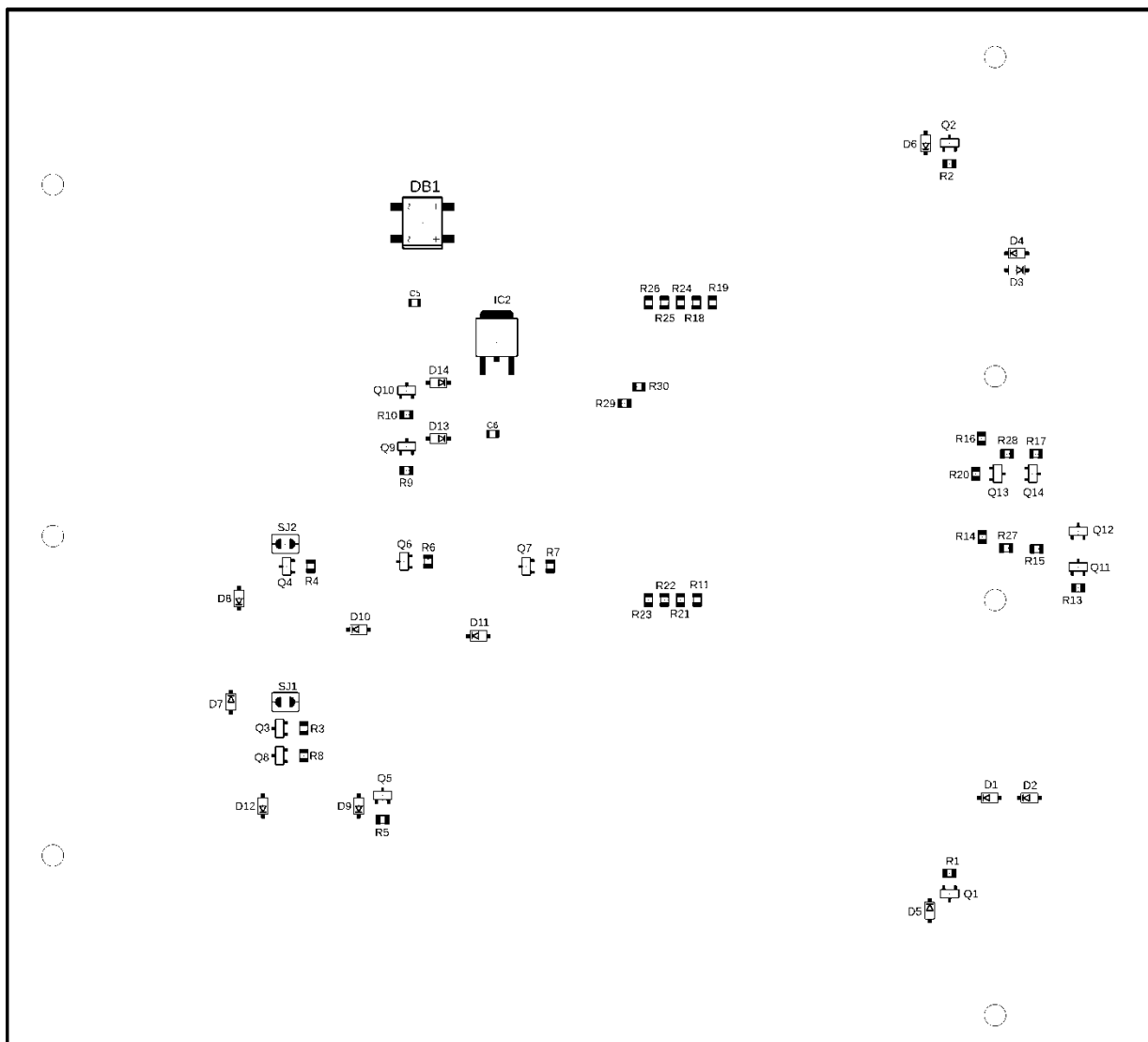




2.4 Osazovací plán – TOP



2.5 Osazovací plán – BOTTOM



2.6 Seznam součástek

Označení	Hodnota / Typ
C5	100n
C6	100n
C1 až C4	2200u / 25V
C17	220u / 100V
C18	220u / 100V
C24	220u / 100V
C25	220u / 100V
C7	220u / 125V
C8 až C12	4700u / 80V
C19	4700u / 80V
C26 až C29	4700u / 80V
D1 až D14	1N4148W-7-F
DB1	DB101S
DB2	GBU15K
DB3	GBU15K

Označení	Hodnota / Typ
F1	100 mA
IC1	L7812CV
IC2	MC7805CDTG
K1 až K4	6-1393243-3
K5 až K8	LEG-12F
Q1 až Q14	NDS7002A
R1 až R13	10k
R18 až R20	10k
R14 až R17	270R
R21 až R26	560R
TR1	BV EI 481 1327
SL1 až SL10	PSH02-02P TP
X1 až X5	PTR AK500
SV1	PSL26

2.7 Popis konektorů

Číslo pinu	Deska	Funkce
1	Motherboard	PWM ventilátor 1
2	Motherboard	PWM ventilátor 2
3	Motherboard	Relé K4
4	Motherboard	Relé K3
5	Motherboard	Relé K8
6	Motherboard	Relé K7
7	Motherboard	Relé K6
8	Motherboard	Relé K5
9	Motherboard	Relé K2
10	Motherboard	Relé K1
11		GND
12		5 V z mikrokontroléru
13	Zdroj 1 a 2	SDA

Číslo pinu	Deska	Funkce
14	Zdroj 1 a 2	SCL
15	Zdroj 2 (BRD2)	CLR
16	Zdroj 1 (BRD1)	CLR
17	Zdroj 2 (BRD2)	LDAC
18	Zdroj 1 (BRD1)	LDAC
19	Zdroj 2 (BRD2)	PWM
20	Zdroj 1 (BRD1)	PWM
21	Zdroj 2 (BRD2)	T2
22	Zdroj 1 (BRD1)	T2
23	Zdroj 2 (BRD2)	T1
24	Zdroj 1 (BRD1)	T1
25	Zdroj 2 (BRD2)	Proudová limitace
26	Zdroj 1 (BRD1)	Proudová limitace

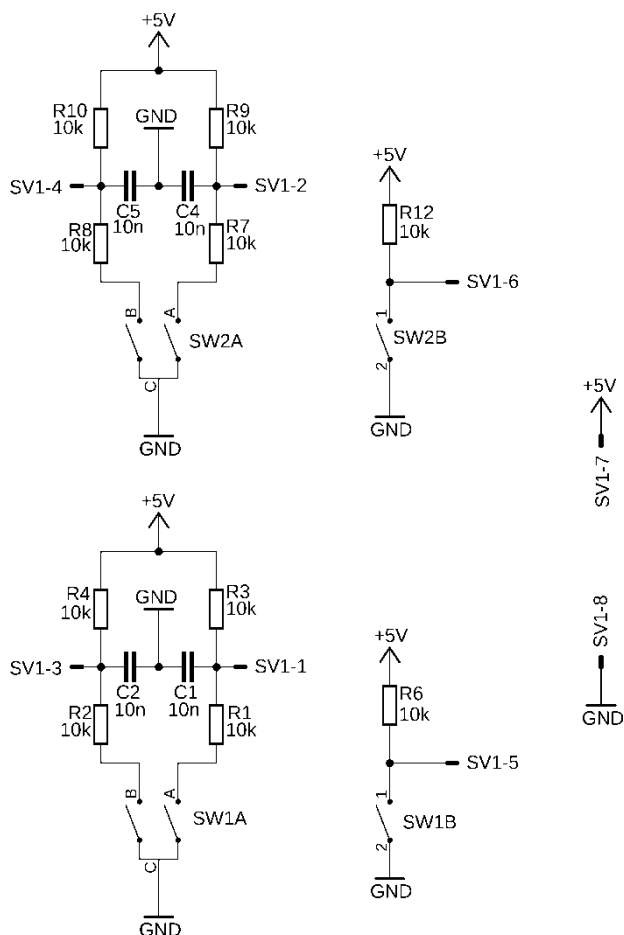
2.8 Popis svorek

Svorka	Kontakt	Funkce	Poznámka
X1	1	Napájení 230 V ~	
	2		
X2	1	Napájení 25 V ~	
	2		
X3	1	Napájení 25 V ~	
	2		
X4	1	Napájení 25 V ~	
	2		
X5	1	Napájení 25 V ~	
	2		
X6	1	Výstup zdroj 1	-
	2		+
X7	1	Výstup zdroj 2	-
	2		+
SL1	1	Ventilátor 1	+
	2		-
SL2	1	Ventilátor 2	+
	2		-
SL3	1	LED režim C.C.	A
	2		K
SL4	1	LED režim C.V.	A
	2		K
SL5	1	LED režim C.C.	A
	2		K
SL6	1	LED režim C.V.	A
	2		K
SL7	1	Výstup 12V	+
	2		-
SL8	1	Výstup 12V	+
	2		-
SL9	1	Výstup 5V	+
	2		-
SL10	1	Výstup 5V	+
	2		-

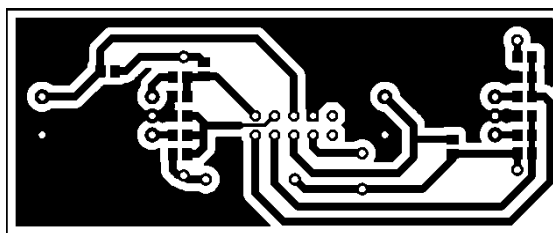
Příloha 3 - Dokumentace digitální části

3.1 Deska enkodérů

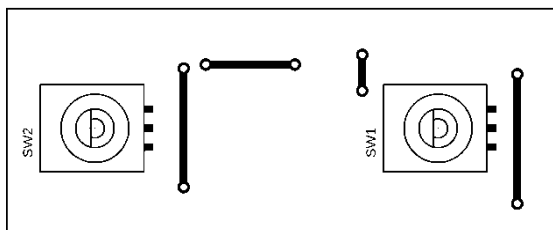
3.1.1 Obvodové zapojení



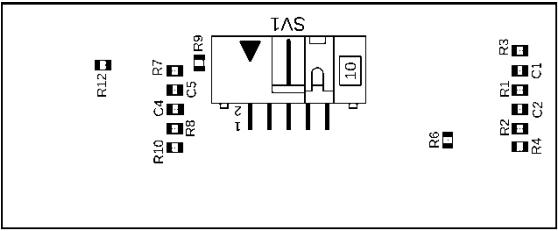
3.1.2 Deska plošných spojů – BOTTOM (strana spojů) rozměry 73 x 29,5 mm



3.1.3 Osazovací plán – TOP (strana součástek); drátové propojky



3.1.4 Osazovací plán – BOTTOM



3.1.5 Seznam součástek

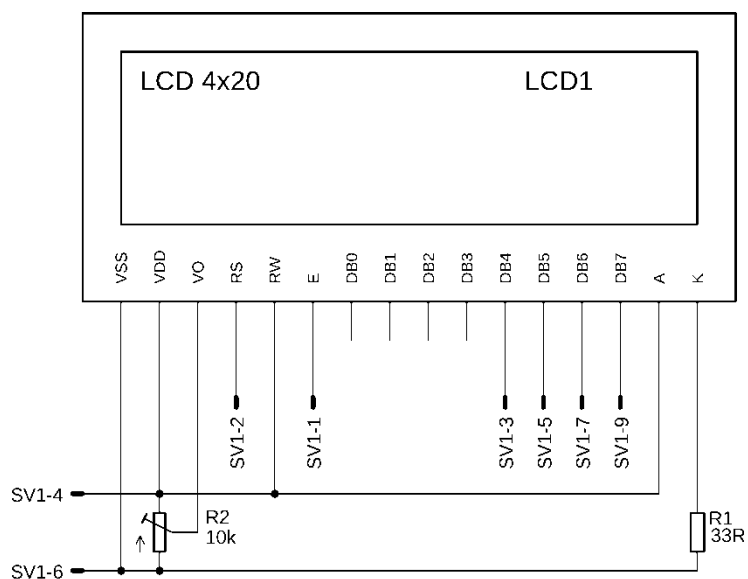
Označení	Hodnota / Typ
R1 až R10	10k
C1 až C4	10n
SW1	PEC11R-4020K-S0024
SW2	PEC11R-4020K-S0024

3.1.6 Popis konektoru

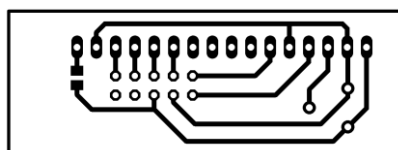
Číslo pinu	Signál
1	SW1 - signál A
2	SW2 - signál A
3	SW1 - signál B
4	SW2 - signál B
5	SW1 - tlačítko
6	SW2 - tlačítko
7	5 V
8	GND
9	-
10	-

3.2 Deska displaye

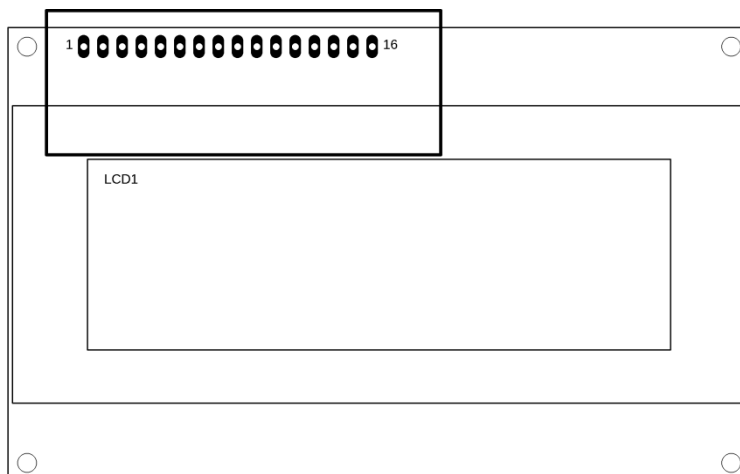
3.2.1 Obvodové zapojení



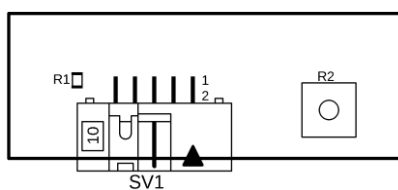
3.2.2 Deska plošných spojů – BOTTOM (strana spojů) rozměry 52 x 19 mm



3.2.3 Osazovací plán – TOP (strana součástek) včetně umístění displaye



3.2.4 Osazovací plán – BOTTOM



3.2.5 Seznam součástek

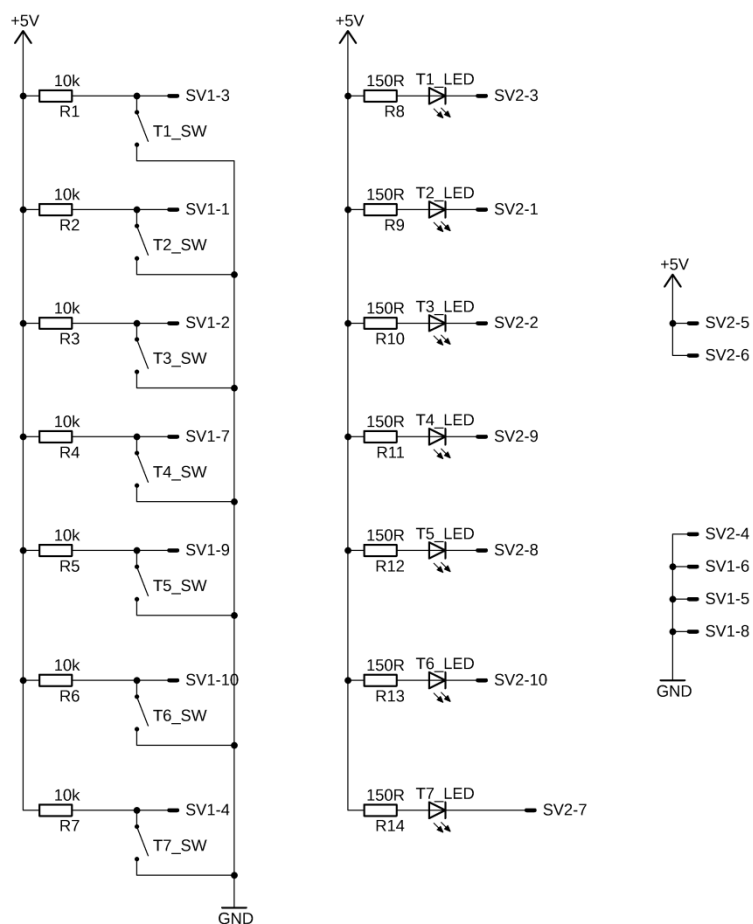
Označení	Hodnota / Typ
R1	trimr 10k
R2	33R
LCD1	RC2004A-BIW-ESX

3.2.6 Popis konektoru

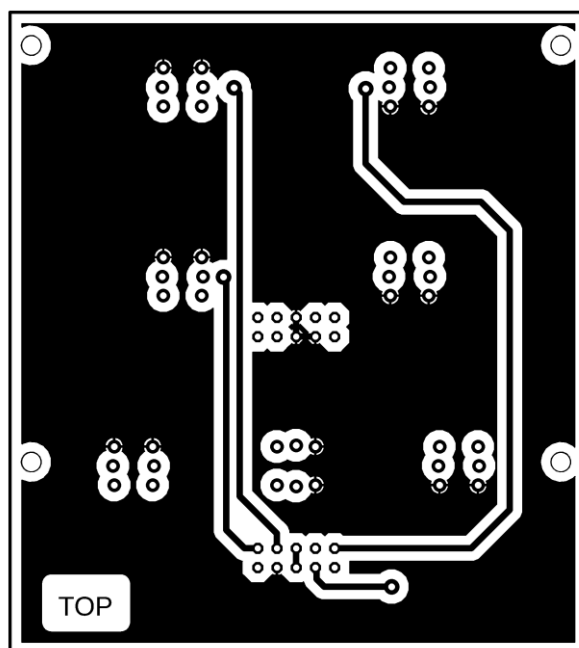
Číslo pinu	Signál
1	E
2	RS
3	DB4
4	5V
5	DB5
6	GND
7	DB6
8	-
9	DB7
10	-

3.3 Deska tlačítek

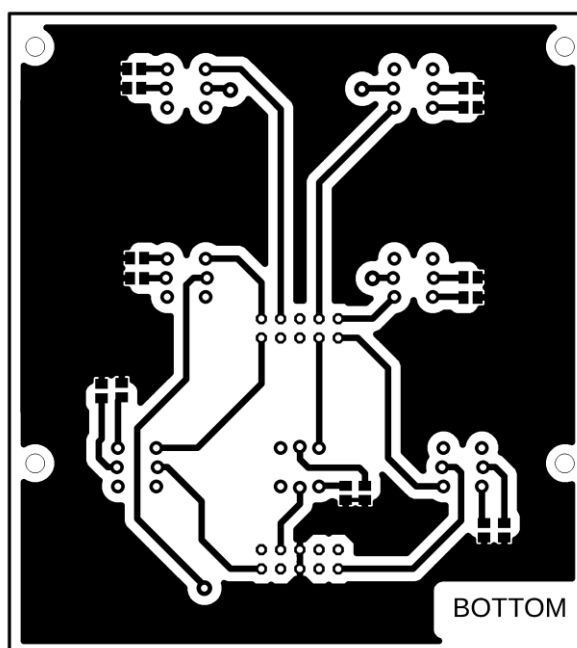
3.3.1 Obvodové zapojení



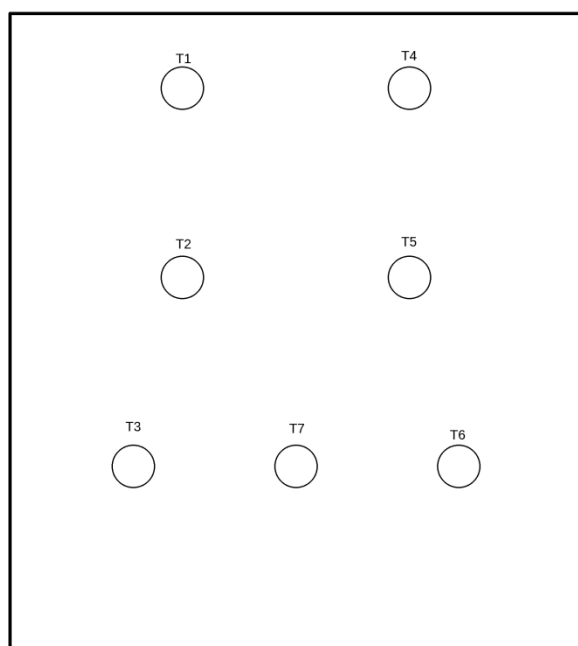
3.3.2 Deska plošných spojů – TOP (strana součástek) rozměry 76 x 85mm



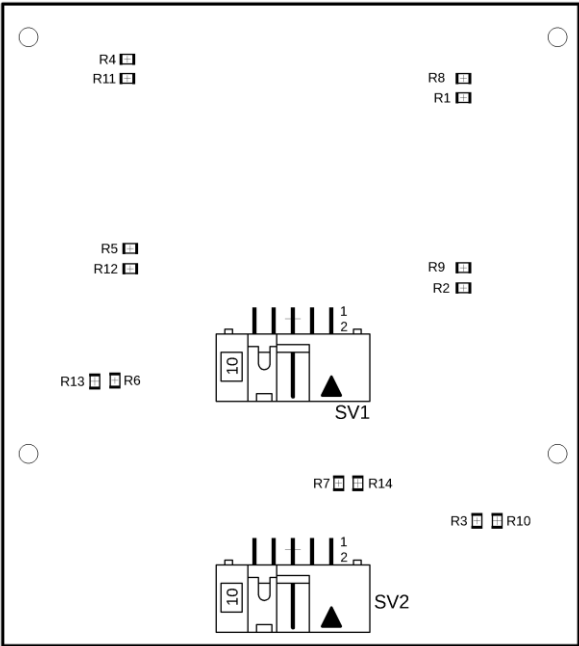
3.3.3 Deska plošných spojů – BOTTOM (strana spojů)



3.3.4 Osazovací plán – TOP



3.3.5 Osazovací plán – BOTTOM



3.3.6 Seznam součástek

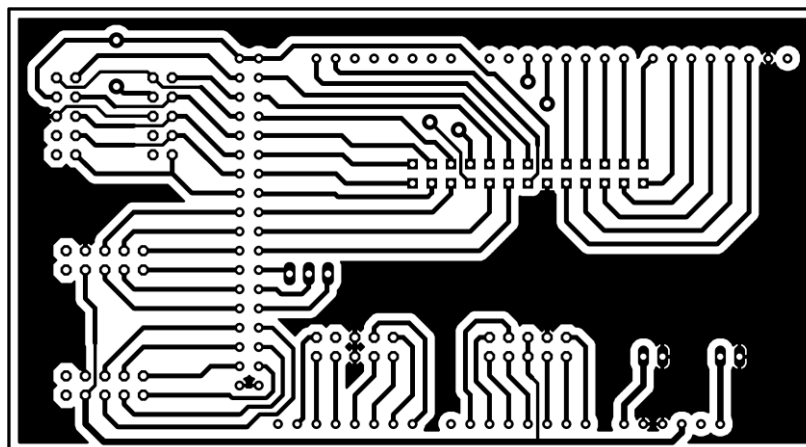
Označení	Hodnota / Typ
R1 až R7	10k
R8 až R14	150R
R4 až T7	PB6149L-3-102

3.3.7 Popis konektorů

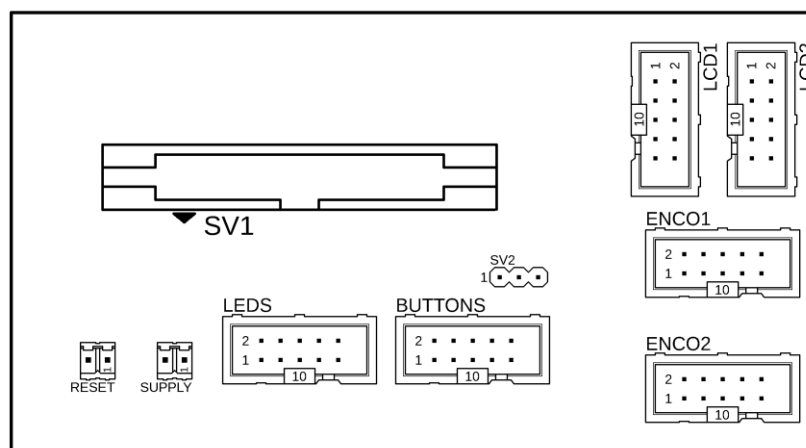
Konektor	Číslo pinu	Signál	Konektor	Číslo pinu	Signál
SV1 (tlačítka)	1	T2	SV2 (podsvícení)	1	T2
	2	T3		2	T3
	3	T1		3	T1
	4	T7		4	GND
	5	GND		5	5 V
	6	GND		6	5V
	7	T4		7	T7
	8	GND		8	T5
	9	T5		9	T4
	10	T6		10	T6

3.4 Arduino Shield

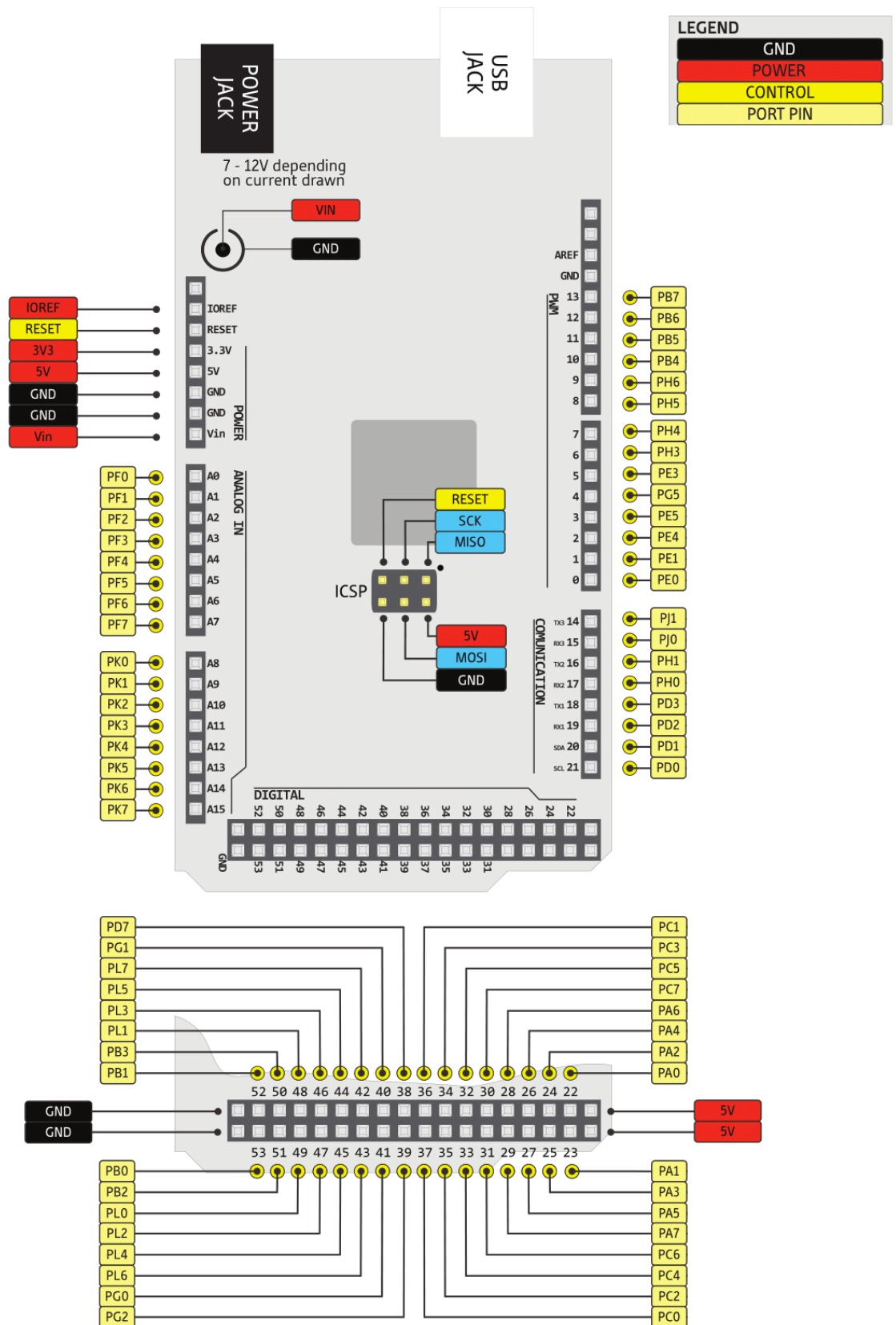
3.4.1 Deska plošných spojů – BOTTOM (strana spojů) rozměry 106,5 x 58,5 mm



3.4.2 Osazovací plán – TOP (strana součástek)



3.4.3 Popis vývodů Arduino Mega



3.4.4 Popis propojení konektorů s Arduino Mega

Vývod Arduino	Konektor	Signál
2	Motherboard	PWM zdroj 2
3		PWM zdroj 1
4		Relé K1
5		Relé K5
6		Relé K7
7		Relé K3
8		PWM ventilátor 2
9		PWM ventilátor 1
10		Relé K4
11		Relé K8
12		Relé K6
13		Relé K2
20		SDA
21		SCL
22		CLR zdroj 1
24		LDAC zdroj 1
26		Teplota 2 zdroj 1
28		Teplota 1 zdroj 1
30		Proud. lim. zdroj 1
32		Proud. lim. zdroj 2
34		Teplota 1 zdroj 2
36		Teplota 2 zdroj 2
38		LDAC zdroj 2
40		CLR zdroj 2
23	Displaye	RS (oba displaye)
25		Enable (display 1)
27		Enable (display 2)
29		DB4 (oba displaye)
31		DB5 (oba displaye)
33		DB6 (oba displaye)
35		DB7 (oba displaye)

Vývod Arduino	Konektor	Signál
37	Enkodéry 1	SW2 tlačítko
39		SW2 signál B
41		SW2 signál A
43		SW1 signál A
45		SW1 signál B
47		SW1 tlačítko
49	Enkodéry 2	SW2 tlačítko
51		SW2 signál B
53		SW2 signál A
52		SW1 signál A
50		SW1 signál B
48		SW1 tlačítko
A0	Podsvícení tlačítek	T3
A1		T2
A2		T1
A3		T7
A4		T4
A5		T6
A6	Tlačítka	T5
A8		T7
A9		T3
A10		T2
A11		T1
A12		T4
A13		T5
A14		T6

Příloha 4 - Fotodokumentace

4.1

Přední pohled



